Liebe Leserinnen, liebe Leser!



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Verfolgt man längere Zeit die Mediendebatte um transgene Pflanzen, dann scheint es, als kämen „Gene“ heute nur noch in Nahrungsmitteln mit manipuliertem Erbgut vor. Langsam, aber sicher ist der Name für die Erbfaktoren fast zum Schimpf- und Schandwort verkommen. Kein Wunder, wenn Pflanzenforscher bei genetisch manipulierten Organismen deshalb verschreckt oft lieber von „biotechnologisch verstärkten Pflanzen“ sprechen. Aber Wortkosmetik beseitigt nicht das Dilemma in der Debatte um die neuen Lebens- und Futtermittel. Die Diskussion befindet sich in einem fatalen Konflikt zwischen Technikfurcht einerseits und dem Hungerproblem der Dritten Welt andererseits.

Vor allem Umwelt- und Menschenschützer glauben, die Antworten auf die kritischen Fragen längst zu kennen: Hat Gen-Nahrung fatale Langzeitfolgen für den Konsumenten, etwa weil sie Gene für Antibiotika-Resistenzen enthält? Werden Ökosysteme geschädigt? Könnten giftige Superpflanzen entstehen? Fördern die Neuschöpfungen gar eine irreversible genetische Umweltverschmutzung?

Das sind schwerwiegende Befürchtungen. Doch nach allen Untersuchungen scheinen die Risiken gering oder beherrschbar zu sein. Dem stehen immense Chancen gegenüber – etwa höhere Erträge, kürzere Reifezeiten, gesteigerte Resistenzen gegen Schädlinge, Salz oder Trockenheit. Ein ausführliches Pro und Kontra drucken wir ab Seite 56.

In ihrem Entwicklungsprogramm haben die Vereinten Nationen erst im Sommer gefordert, gegen die Hungersnot in den ärmsten Ländern auch auf gentechnisch veränderte Nutzpflanzen zu setzen. Das ruft die Gen-Gegner auf den Plan. Letztlich ist ihr Widerstand aber nicht frei von der Arroganz der Satten gegenüber Hungrigen. Über 800 Millionen Menschen leiden an Hunger oder Mangelernährung, das sollte jede Anstrengung wert sein, selbst um den Preis eines gewissen Risikos.

Manche Kritiker der Gentechnik halten solche Argumente nur für moralische Erpressung. Gewiss muss man nicht blauäugig allen Heilsversprechungen glauben. Natürlich geht es ums Geschäft. Aber konstruktives Misstrauen und begleitende Kontrolle sollten als Vorsichtsmaßnahme reichen.

Im Übrigen neigen wir ohnedies dazu, beim Essen den Status quo zu verklären; dabei hat es eine „sichere Nahrung“ nie gegeben. Täglich konsumiert jeder von uns bis zu zehntausend Giftstoffe. Viele davon, zum Beispiel im Kaffee, haben sich in Tierversuchen als Krebs erregend herausgestellt. Die Gentechnik hat nach heutigem Kenntnisstand noch kein Lebensmittel unsicherer gemacht, als es unsere tägliche Mahlzeit seit jeher war.

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer



Den Geheimnissen des Denkens widmen sich unsere beiden neuen Sonderhefte. Was mit dem Philosophen und Mathematiker René Descartes begann, ist heute Teil moderner Erforschung von Bewusstsein, Gedächtnis und Erinnerung.

INHALT

TITELBILD:
Das Kleinhirn erkennen die Forscher in letzter Zeit als ein Zentrum erstaunlicher Leistungen. Vor allem ist es eigenständige Schaltzentrale der gesamten Körpermotorik.
Grafik: CMSP / Okapia

FORSCHUNG AKTUELL

SPEKTROGRAMM

HAUPTARTIKEL



TITELTHEMA:

Das unterschätzte Kleinhirn

Seite 36

Von Detlef Heck und Fahad Sultan

Das Kleinhirn koordiniert präzise Bewegungen, hilft beim Hören von Sprache und bei anderen geistigen Leistungen. Mit dem streng geometrischen Schaltplan seiner Nervenzellen erkennt es offenbar kleinste Zeitunterschiede zwischen eintreffenden Signalen.

ASTROCHEMIE

Kosmisches Eis – Wiege des Lebens?

Seite 28

Von David F. Blake und Peter Jenniskens

Eis in seiner uns vertrauten Form ist lebensfeindlich. Doch eine exotische Variante im Weltall kann die Bildung organischer Moleküle fördern – und hat vielleicht den Grundstein für das Leben auf der Erde gelegt.





GEBÄRDENSPRACHE

Sprechende Hände

Seite 46

Von Gregory Hickok, Ursula Bellugi und Edward S. Klima

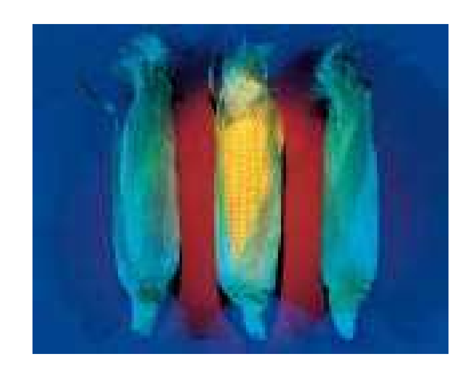
Nicht nur der Mund kann reden, auch die Hände können es. Die Gebärdensprachen der Gehörlosen liefern neue Erkenntnisse darüber, wie das Gehirn mit Sprache umgeht.

GRÜNE GENTECHNIK

Risiko oder Rettung für die Welt?

Seite 56

Zwei führende Experten in der Debatte um genmanipulierte Nutzpflanzen stellen ihre Argumente vor. Einführung: Hermann Englert.





METALLURGIE

Wunder der Schmiedekunst Damaszenerklingen

Seite 62

Mit John D. Verhoeven

Orientalische Schmiede schufen einst Stahlklingen von unübertroffener Güte. Das Abendland kam nie hinter das Geheimnis ihrer Kunst. Der Autor und ein Schmied haben es nun gelüftet.

ANTIBIOTIKA

Kampf gegen Antibiotika-Resistenz

Seite 68

Von K. C. Nicolaou und Christopher N. C. Boddy

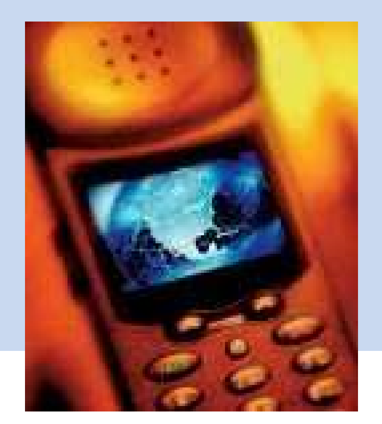
Krankheitserreger lernen, Antibiotika auszutricksen. Manche von ihnen besiegen bereits sämtliche gegen sie verfügbaren Waffen. Doch Biochemiker beginnen diese Strategien der Bakterien zu verstehen – und begegnen ihnen mit darauf maßgeschneiderten Medikamenten.



UMTS: Mobilfunk der dritten Generation

Seite 76

Vier Buchstaben, mit denen die Telekommunikationsbranche große Hoffnungen verbindet, die auch für „Internet und Video per Handy" stehen sollen. Doch ob sich die teuren Lizenzen für die nächste Mobilfunk-Generation wirklich lohnen, bezweifeln manche Skeptiker.



Inhalt:

- Die Schritt-Macher
- Die Mega-Handys
- Neue Hardware braucht das UMTS-Land
- Dringend gesucht: die Killer-Applikation
- Peilstation in der Westentasche
- UMTS++

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

REZENSIONEN

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

WEITERE RUBRIKEN

Raketen unter Wasser August 2001

Nicht zeitgemäß

Der Artikel von Steven Ashley lässt jede Distanzierung vom Thema Waffentechnik vermissen und erscheint damit nicht eben zeitgemäß. Dies trifft insbesondere auf den Aspekt der Bestückung von Torpedos mit nuklearen Sprengköpfen zu. Der Artikel „Virtuelle Nukleartests“ (SdW 1/2000, S. 60) hat gezeigt, dass ein solches Thema auch in einer Weise behandelt werden kann, die der Verantwortung der Wissenschaft besser gerecht wird. Abgesehen von verfahrenstechnischen Anwendungen bleibt die Kavitation für mich ein Phänomen, dass es zu vermeiden gilt. Zu Wirkungsgradverlusten und Erosion sind nun superkavitierende Torpedos hinzugekommen.

Henrik Lohrberg, Frankfurt

PHILIP HOWE



Torpedo erzeugt durch hohe Geschwindigkeit Hülle aus Gasblasen.

Liebevolle Detaildarstellung

Ihre Darstellungsweise „künftiger Unterwasserwaffen“ ohne auch nur die geringste Andeutung eines „leider wieder einmal“ oder „leider immer noch überwiegend“ oder wenigstens Ergänzungen wie „leider absehbar nicht in der zivilen Schifffahrt“ hat mir heute entschieden das Samstagsfrühstücksvergnügen einer SdW-Lektüre verdorben.

Paul Christ, Weinstadt

Antibiotikaresistente Keime in Rohwürsten

Spektrogramm – August 2001

Folgen des Leichtsinns

Ein brisantes Thema, da zur Zeit noch gut therapierbare, fakultativ pathogene Keime, wie hier z. B. die Enterokokken, immer mehr gegen Antibiotika resistent werden.

Jährlich werden Milliarden Euro in die Antibiotikaforschung investiert und gleichzeitig verfüttern Tierzüchter, auf legalen Wegen und prophylaktisch, hoch wirksame Antibiotika und machen sie so irgendwann unwirksam.

Tammo Lüssenhop, Lehrte

Kein legaler Missbrauch in Deutschland

Der Artikel mag seine Richtigkeit in anderen Ländern finden, doch in Deutschland ist der vorsorgliche Einsatz von Antibiotika streng verboten. Es mag schwarze Schafe geben, die so etwas illegal praktizieren, doch der gewissenhafte und wirtschaftliche Betrieb hat das nicht nötig, da er auch ohne solche Maßnahmen eine gute Tageszunahme bei den Tieren zu verzeichnen hat. Des Weiteren bekommt der Landwirt die Medikamente nur vom Veterinär und dieser wird sich hüten, sie für einen solchen Verwendungszweck herauszugeben, da er dann unter Umständen seine Lizenz verliert. Landwirtschaftliche Betriebe, die sich dem Markenfleischprogramm angeschlossen haben, müssen eh über jede Verabreichung von Medikamenten Buch führen. Zudem ist es nicht unbedingt wirtschaftlich, teure Medikamente zu verabreichen.

Klaus Tegeder, Lingen

Erratum

Mangelware Wasser – August 2001

Der Pont du Gard versorgte die Stadt Nîmes täglich mit ausreichend Wasser. Bei der angegebenen Menge handelt es sich nicht um Liter, sondern um Kubikmeter.

Red.

Das Geheimnis der Mumien

August 2001

Moderne Mumien

Bei der Lektüre dieses Artikels hat mich überrascht, mit keinem Wort die heutige Möglichkeit langfristiger Konservierung seit Ende des 20. Jhs. durch Plastination erwähnt zu finden, wie sie in Ihrem Artikel von Gunther von Hagens (SdW 12/97) beschrieben wurde.

Nicht mehr (pflanzliche) Balsame kommen dabei zum Einsatz, sondern verschiedene Kunststoffe (vor allem Silikonkautschuk). Die Herstellung dieser modernen „Mumien“ erfolgt auch in mehreren Schritten: Nach Austausch des Wassers der Gewebeflüssigkeit durch Aceton (per Diffusion) erfolgt ein weiterer Austausch mit dem Reaktionskunststoff (durch forcierte Vakuum-Imprägnierung). Die Präparate sind trocken und geruchlos. Je nach verwendetem Kunststoff zeigen sie feinste Nervenverläufe bis in die Tiefe (transparente Körperscheiben) oder Organe mit und ohne Schädigungen durch Krankheiten wie Krebs oder Raucherlunge. Sie können Körperfunktionen wie Bewegungen oder Blutkreislauf bis hin zur Entwicklung des Menschen im Mutterleib darstellen.

Dr. Cornelia Liesenfeld, Augsburg

Was geschah mit dem Gehirn?

Was das Entfernen des Gehirns aus der Schädelkapsel angeht, so dürfte es kaum möglich sein, nach Durchstoßen des Siebbeins dieses mit Haken herauszuziehen. Dazu ist es zu weich, sodass Haken keinen Halt finden. Vielmehr wird das Gehirn bereits nach kurzer Fäulnis so flüssig, dass man es mit Wasser herausspülen kann. Eine „gewebslösende Infusion“ ist dazu nicht nötig. Bleibt das Gehirn im Schädel, so trocknet es – bei Rückenlage der Leiche – während des Mumifizierungsprozesses im Hinterhauptsbereich ein, allerdings ohne den Knochen zu durchtränken, wie die Abbildung auf S. 36 suggeriert.

Irgendwelche Flüssigkeiten, die in die (entleerte) Brustkorbhöhle gegossen werden, finden keinen Weg über den Rückenmarkskanal in die Kopfhöhle. Selbst wenn ein flüssiges Konservierungsmittel aus der Brustkorbhöhle bis in das „Unterhautgewebe des Nackens gesickert“ ist, so bedeutet das nicht, dass es von dort auch den Weg ins Schädelinnere finden kann. Ich halte diesen Mechanismus für anatomisch unmöglich, selbst wenn man eine artifizielle oder fäulnisbedingte starke Auflockerung der Gewebe zu Grunde legt.

Dr. med. Achim. Th. Schäfer, Aachen

ANDRÉ MACKE



Diese Mumie aus römischer Zeit ist von Balsamierungssubstanzen schwarz gefärbt.

Die Wahrheit in der Wissenschaft Juli 2001

Begriffsbestimmung von Wahrheit

In dieser Diskussion irritiert mich, dass nicht auf die anerkannteste Begriffsbestimmung von Wahrheit zurückgegriffen wird, wonach Wahrheit in der Übereinstimmung einer Aussage mit ihrem Gegenstand bestehe, die so genannte Korrespondenztheorie der Wahrheit.

Das Problem dabei ist: Wo und wer ist der Gegenstand?

Der Gegenstand der Soziologie ist nun sicher die menschliche Gesellschaft, und dass die ein sehr buntes und oft wechselndes Bild bietet, ist unbestritten.

Der Gegenstand der Naturwissenschaften aber ist die Natur, als Inbegriff einer unabhängig vom Menschen bestehenden Wirklichkeit. Von ihr versuchen die exakten Wissenschaften, ein möglichst zutreffendes Bild zu entwerfen, wobei als bessere Theorie die mit der größeren Erklärungskraft gilt (Popper). Wenn man jedoch mit Stichweh die Existenz einer solchen Wirklichkeit leugnet bzw. sie so weit hinausschiebt, dass sie für den Menschen nicht mehr erreichbar ist, dann verliert die Wahrheit ihren Gegenstand, Wahrheit wird zu Maja, zum bloßen als ob. Das dürfte letztlich dann auch für die Behauptungen der Soziologie gelten. Doch zu solch radikaler Skepsis ist kein Anlass. Allein schon die Tatsache, dass wir in und von dieser Wirklichkeit leben, in Auseinandersetzung mit ihr überleben, spricht dagegen.

Dr. Walter Jerg Hönes, Upfingen

Realität aus dem Erkenntnisprozess herauskatapultiert

Was nutzt es, in kurzen Abständen die Formel zu wiederholen, dass „die Wirklichkeit immer draußen bleibe“? Die Wahrheit eines Satzes wird durch bloße Wiederholung desselben nicht bewiesen. So bleibt bei Herrn Stichwehs Einlassungen unklar, was das Fundament von Erkenntnis überhaupt sein soll. Sein Credo, dass die Wirklichkeit immer draußen bleibe, weist ihn als dem Realismus ablehnend gegenüberstehenden Sozialwissenschaftler aus. Er katapultiert per Dekret die Realität aus dem Erkenntnisprozess heraus und reduziert Letzteren auf einen Kommunikationsprozess, wobei hier offen bleibt, was er denn darunter versteht. Es sieht so aus, als sei der Prozess der als Erkenntnisse von den Naturwissenschaften angebotenen Sätze lediglich aus der Sicht und mit den Methoden der Wissenschaftspsychologie zu analysieren und zu interpretieren.

Stichwehs Position mündet nicht nur in einen ontologischen, sondern auch in einen epistemischen Nihilismus. Nach seiner Auffassung hätte Erkenntnis allenfalls so etwas wie Definitionscharakter, wobei in einer Wissenschaftsgemeinschaft die gerade akzeptierten Definitionen willkürlicher Veränderbarkeit zu unterliegen scheinen. Das, was im Prozess der internen Selektion die größte Überzeugungskraft entfaltet, werde als „wahre Erkenntnis“ hingenommen und nach außen ausgegeben.

Heinz Sauer, Berlin

Die Stresssignale der Pflanzen
August 2001

„Chemische Kampfstoffe“ in Holz

Die drastische Ankurbelung der Terpen-Produktion in gestressten Pflanzen hat noch einen weiteren, sehr konkreten Bezug zum täglichen Leben: Bekanntlich sind einige Terpene wie Delta-3-Caren oder alpha-Pinen potente Allergene. Das so genannte Malerekzem beispielsweise ist eine sehr unangenehme Kontaktallergie auf Terpentin, das nichts anderes als ein Gemisch verschiedener Terpene ist, die durch Destillation aus Nadelholzabfällen gewonnen werden. Diese „chemischen Kampfstoffe“ der Pflanzen sind natürlich auch nach dem Fällen und Zusägen des Baumes im Holz enthalten. Wird dieses als Bau- oder Möbelholz verwendet, werden die enthaltenen Terpene an die Raumluft abgegeben und finden sich dann in der Luft von Wohnräumen wieder, wo sie bei vorsensibilisierten Personen erhebliche Probleme verursachen können.

Christian Krippenstapel, Hildesheim


FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH

Tabakpflanzen im Stresstest

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft,
Ursula Wessels,
Postfach 10 48 40,
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 91 26-716

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle, Christina Peiberg
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer (stv. Herstellerin), Karsten Kramarczik (Artwork Coordinator), Andreas Merkert
Redaktionsassistenz: Cornelia Schenck, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-716
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Herstellung: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 91 26-730
Marketing und Vertrieb: Annette Baumbusch, Anke Walter, Tel. (0 62 21) 91 26-741/744; E-Mail: marketing@spektrum.com
Sonderteil UMTS: Konzeption und Realisierung durch SciPress Kommunikationsservice für Technik, Wirtschaft und Wissenschaft, Tsakiridou, Schurr, Eberl GbR, Altlaufstr. 9, 85635 Höhenkirchen
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Johannes Classen, Dr. Hilde Fischer, Dr. Olaf Fritsche, Dr. Werner Gans.
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 6, 69126 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-716
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Marianne Blume, Tel. (0 62 21) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft DM 13,50/€ 6,90/sfr 13,50/öS 98,–; im Abonnement DM 147,86/€ 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) DM 127,91/€ 65,40. Die Preise beinhalten DM 11,73/€ 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen DM 11,74/€ 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung: Andreas Formen; Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (02 11) 887-2379, Fax (02 11) 887 97 23 79 verantwortlich für Anzeigen: Gabriele Reichard, Kasernenstraße 67, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-2341/93, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Gunter-E. Hackemesser, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 84, Fax (0 40) 33 90 90; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Herbert Piehl, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Dirk Schaeffer, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16-18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 82; Stuttgart: Erwin H. Schäfer, Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 84, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Zur Zeit gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 22 vom 1. Januar 2001.
Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971
Ein Teil unserer Auflage enthält Beilagen von Wissenschaft-online, Heidelberg; GLOBO Ringier Publ. GmbH, München; National Geographic, Hamburg; VNR-Verlag, Bonn und Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Denise Anderman, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

TEILCHENPHYSIK

Neutrinomasse – und es gibt sie doch!

Messungen am kanadischen Sudbury-Neutrino-Observatorium haben den bisher überzeugendsten Beweis dafür erbracht, dass Neutrinos auf dem Weg von der Sonne zur Erde ihre Identität wechseln können. Demnach sind sie im Widerspruch zum heutigen Standardmodell der Teilchentheorie nicht masselos.

Von Georg Wolschin

Eines der großen Rätsel, das die Physiker seit 1968 beschäftigt, nähert sich mit rasanten Schritten seiner endgültigen Lösung: das Sonnenneutrino-Problem. Die Sonne gewinnt ihre immense Energie bekanntlich aus der Fusion von Wasserstoff zu Helium und anderen schwereren Elementen. Nebenher entstehen dabei zahlreiche Elektron-Neutrinos. Da sie nur sehr schwach mit Materie wechselwirken, braucht es aufwendige Experimente, den auf der Erde ankommenden Strom dieser Teilchen zu bestimmen.

Zwischen 1968 und 1970 gelang Raymond Davis und seinen Kollegen mit Hilfe eines unterirdischen Tanks aus 400000 Litern Perchlorethylen die erste solche Messung. Das Ergebnis überraschte die Sonnenforscher: Der ermittelte Fluss an hochenergetischen solaren Neutrinos hatte nur etwa ein Viertel bis ein Drittel der erwarteten Intensität. Spätere Messungen bestätigten das Defizit. Dazu zählte insbesondere das Gallex-Experiment im italienischen Gran-Sasso-Tunnel in den 1990er Jahren. Es erfasste erstmals auch die niederenergetischen Neutrinos, die aus dem Hauptzweig der solaren Fusionsreaktionen stammen: der Verschmelzung von zwei Protonen zu einem Deuterium-Kern. Ihre Menge erreichte zwar fast den theoretisch vorausgesagten Wert, die Gesamtzahl der Neutrinos fiel jedoch auch bei diesem Experiment deutlich zu gering aus.

Für den Fehlbetrag diskutieren die Forscher seither zwei mögliche Ursachen: Unzulänglichkeiten im Sonnenmodell oder Besonderheiten im Verhalten der Neutrinos, die in der Standard-Teilchentheorie nicht vorgesehen sind. Erste Entscheidungshilfe lieferten Vergleiche zwischen den Ergebnissen der diversen Experimente, die bis heute durchgeführt wurden. Sie erlauben Rückschlüsse darauf, wie hoch der Anteil von Neutrinos, die von unterschiedlichen Zweigen des Fusionsprozesses stammen, am gesamten Fluss ist. Diese Abschätzungen stehen in Einklang mit dem Sonnenmodell.

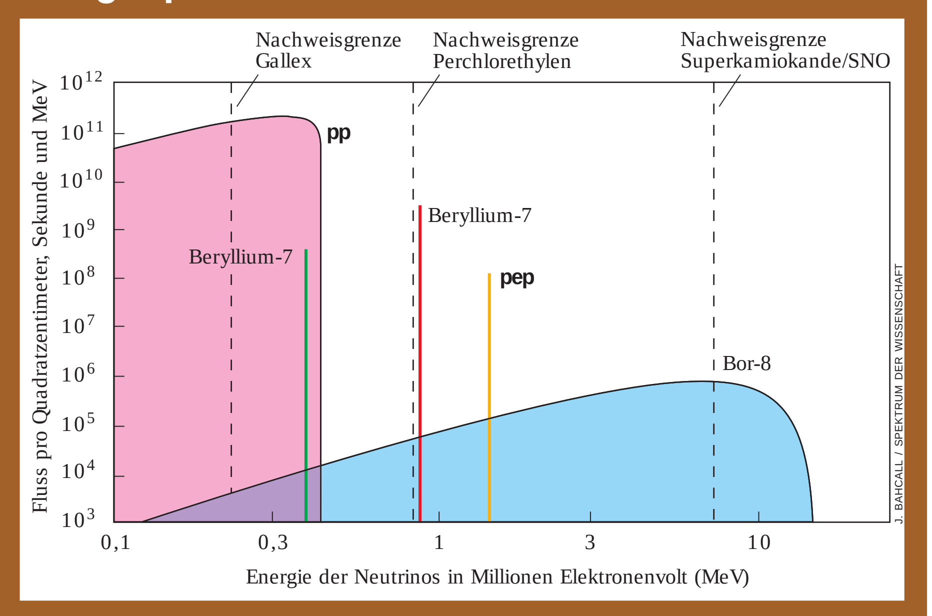
Dasselbe gilt für die Ergebnisse helioseismischer Untersuchungen aus neuerer Zeit. Die dabei gemessenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Schallwellen in der Sonne stimmen auf 0,1 Prozent genau mit den Vorhersagen des Sonnenmodells überein. Alle denkbaren Erklärungen für einen geringeren solaren Neutrinofluss postulieren eine niedrigere Temperatur im Zentrum unseres Zentralgestirns. Dies steht jedoch im Widerspruch zu den seismischen Geschwindigkeiten.

Diese Resultate deuteten bereits darauf hin, dass die Ursache des solaren Neutrinoproblems in den Teilchen selbst liegt. Mit dem Ergebnis des jetzigen Experiments am kanadischen Sudbury-Neutrino-Observatorium SNO neigt sich die Waagschale nun endgültig dieser Erklärung zu. Demnach rührt das Defizit aller Wahrscheinlichkeit nach daher, dass die Elektron-Neutrinos auf ihrem Weg vom Zentrum an die Oberfläche der Sonne und auf dem etwa acht Minuten dauernden Flug zur Erde in eine der beiden anderen Neutrino-Arten (Myon- oder Tau-Neutrino) umgewandelt werden, die bei den bisherigen Experimenten nicht nachweisbar waren.

Grundbedingung für eine solche Umwandlung ist, dass Neutrinos eine von null verschiedene Ruhemasse haben. In diesem Falle sind die drei bekannten Arten nur Überlagerungen von verschiedenen Masse-Eigenzuständen, zwischen denen die Teilchen umso schneller wechseln können, je „schwerer“ sie sind.

Deutliche Anzeichen für solche Oszillationen und damit für eine von null verschiedene Neutrino-Ruhemasse lieferte erstmals vor drei Jahren das Superkamiokande-Experiment in Japan bei atmosphärischen Antineutrinos (Spektrum der Wissenschaft 8/98, S. 14). Diese entstehen, wenn kosmische Strahlen auf die Erdat-

Energiespektrum der Sonnenneutrinos



Die diversen Experimente zur Messung der Sonnenneutrinos erfassten jeweils nur einen Teil des energieabhängigen Teilchenflusses, der sich aus dem Standard-Sonnenmodell ergibt. So ließen sich mit dem japanischen Superkamiokande- und dem kanadischen Sudbury-Neutrino-Observatorium (SNO) lediglich die energiereichsten Neutrinos messen, die beim Zerfall von Bor-8 entstehen (blau). Auch das erste Experiment mit Perchlorethylen konnte keine Neutrinos aus dem Hauptfusionsprozess registrieren – der Verschmelzung zweier Protonen zum Deuterium (pp; rot). Das gelang erst der Gallex-Kooperation.

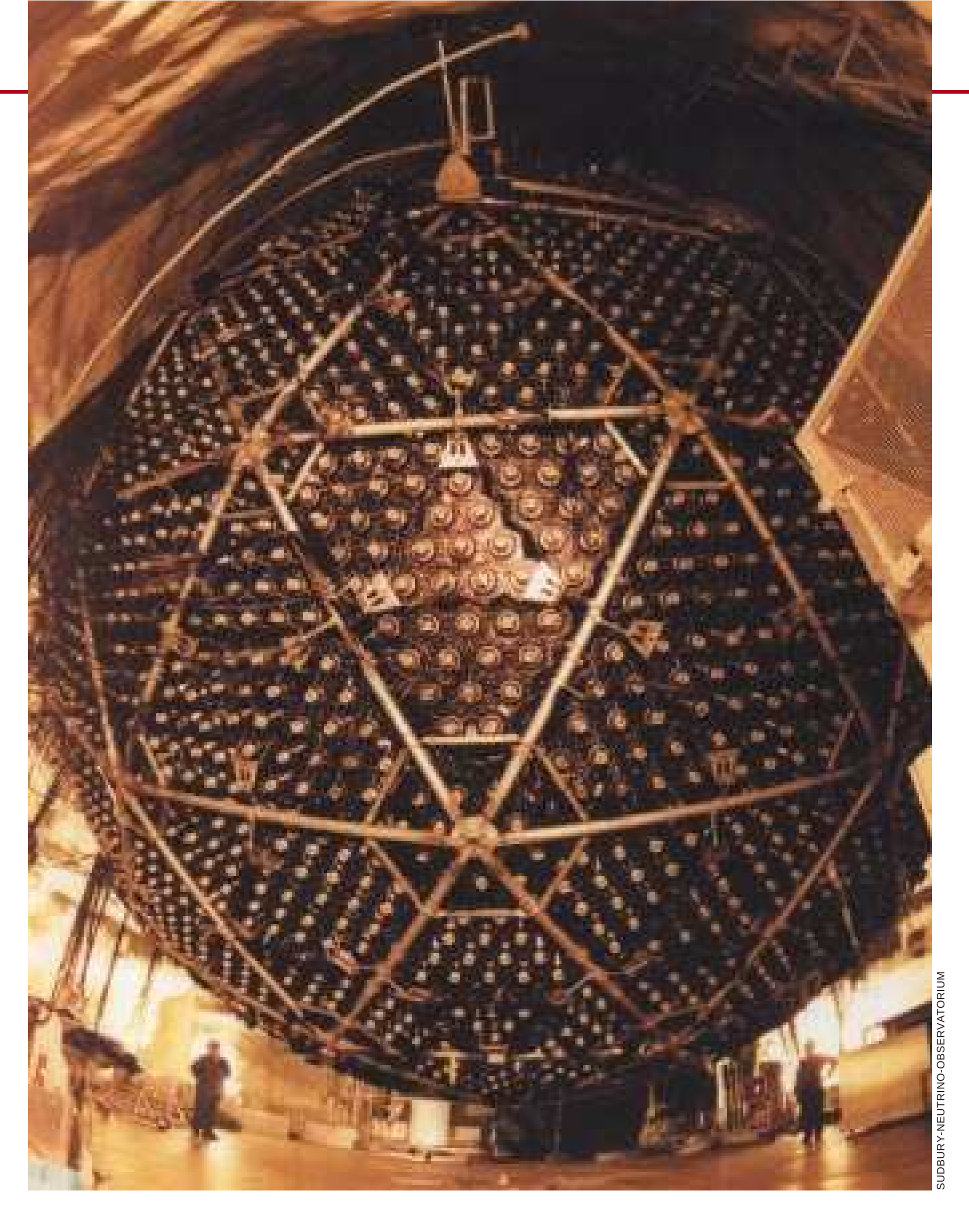
mosphäre treffen, und sind anhand ihrer sehr hohen Energie, die mehr als 10 Milliarden Elektronenvolt betragen kann, klar von den solaren Neutrinos zu unterscheiden, die nur bis etwa 20 Millionen Elektronenvolt erreichen. Die Daten des Superkamiokande-Experiments, bei dem ein 41 Meter hoher Tank mit 50 000 Tonnen Wasser in einem 1000 Meter tiefen Bergwerksstollen als Detektor diente, deuteten auf die Umwandlung von Myon- in Tau-Antineutrinos hin. Dass der Wechsel von Elektron-(Anti-)Neutrinos in eine der anderen beiden Neutrino-Arten nicht beobachtet werden konnte, verwundert nicht. Er geschieht nämlich wesentlich langsamer – zu langsam, um auf der kurzen Strecke von der Atmosphäre zum Detektor stattzufinden, selbst wenn die Teilchen vorher die Erde durchqueren.

Wechsel der Identität

Auf dem Weg vom Zentrum der Sonne zur Erde ist eine solche Oszillation aber sehr wohl möglich. Das liegt zum einen an der viel längeren Strecke, zum anderen aber auch daran, dass die Umwandlung innerhalb der Sonne bei Neutrinos durch eine so genannte Resonanz beschleunigt wird. Auf diese Tatsache hatten die russischen Physiker Stanislaw P. Michejew und Alexej J. Smirnow schon 1986 auf einem Symposium in Heidelberg hingewiesen. Der Effekt wird heute als MSW-Effekt bezeichnet, wobei W für den US-Physiker Lincoln Wolfenstein steht, der auch zur theoretischen Ableitung beigetragen hat. Wie diese resonante Umwandlung der Elektron-Neutrinos in Myon- und Tau-Neutrinos im Einzelnen stattfindet, hängt von der Energie der Neutrinos, der Entfernung vom Erzeugungsort und der Differenz ihrer Massenquadrate ab. Für das theoretische Modell, das die Identitätsänderung beschreibt, gibt es mehrere Lösungsmöglichkeiten. Welche die richtige ist, muss durch Vergleich mit den experimentellen Daten bestimmt werden.

Das Sudbury-Neutrino-Observatorium (SNO) besteht aus einem kugelförmigen Detektor von zwölf Metern Durchmesser mit 1000 Tonnen schwerem Wasser, eingebettet in 7000 Tonnen normales Wasser (Bild oben). Zur Abschirmung kosmischer Strahlung ist die Anlage in einer Nickelmine über zwei Kilometer tief unter der Erde in Ontario installiert. Etwa fünf Neutrinos pro Tag werden registriert.

Die Nachweisgrenze liegt bei ungefähr fünf Millionen Elektronenvolt (Bild links). Gemessen werden deshalb nur hochenergetische Elektron-Neutrinos aus einem Seitenzweig der Fusionsprozesse in der Sonne: dem Zerfall von Bor-8 in Beryllium-8 und ein Positron. Das geschieht zum einen anhand der Reaktion der Neutrinos mit dem Deuterium des schweren Wassers. Dabei entstehen je zwei Protonen und ein Elektron. Dieses bewegt sich zunächst schneller als Licht in Wasser und sendet deshalb so genannte Tscherenkowstrahlung aus, zu deren Beobachtung 9456 Photomultiplier (Lichtverstärker) um den Tank herum angebracht sind.


SUDBURY-NEUTRINO-OBSERVATORIUM

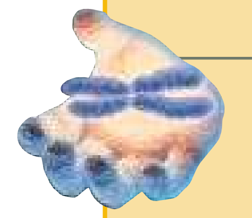
Der Detektor des kanadischen Sudbury-Neutrino-Observatoriums (SNO) besteht aus einem kugelförmigen Tank von zwölf Metern Durchmesser mit 1000 Tonnen schwerem Wasser, das von 7000 Tonnen normalem Wasser umgeben ist. 9456 Photomultiplier rund um den Tank registrieren die von Neutrinos verursachten Lichtblitze. Zur Abschirmung kosmischer Strahlung befindet sich die Anlage in einem Bergwerk gut zwei Kilometer unter der Erde.

Auf diese „klassische“ Weise können gezielt nur solare Elektron-Neutrinos nachgewiesen werden. Parallel dazu erlaubt der Detektor aber auch den Nachweis von Neutrinos, die elastisch an Elektronen gestreut werden. Und dieser Prozess spricht – obwohl nur schwach – auch auf Myon- und Tau-Neutrinos an, die durch Oszillationen entstehen. In 241 Tagen wurden mit beiden Verfahren bisher insgesamt 1169 Ereignisse gezählt.

Interessant ist nun der Vergleich der Ergebnisse beider Nachweismethoden. Die Reaktion mit Deuterium lieferte einen Wert für den Neutrinofluss bei hohen Energien, der um 3,3 Standardabweichungen kleiner ist als derjenige aus der elastischen Streuung, sofern man dafür das mit dem Superkamiokande-Detektor gemessene Präzisionsresultat einsetzt. Demnach wurden mit dem zweiten Verfahren offenbar zusätzlich Myon- oder Tau-Neutrinos nachgewiesen, die durch Oszillationen aus Elektron-Neutrinos entstanden sind. Dies ist das erste direkte Anzeichen für eine solche Umwandlung bei solaren Neutrinos.

Außerdem konnte der gesamte Fluss an aktiven Neutrinos aus dem Zerfall von Bor-8 bestimmt werden. Die gefundenen 5,44 Millionen Teilchen pro Quadratzentimeter und Sekunde stimmen recht gut ▶

Serie: Die Botschaft des Genoms (Schluss)



Anlässlich der Entzifferung des menschlichen Erbguts stellten wir beispielhaft zwölf darin codierte Proteine vor.

Die übrigen 30 000 Gene

Eine Art Nachwort



GRAFIK: JEFF JOHNSON

Michael Groß *ist Biochemiker in Oxford (England)*

In den vergangenen zwölf Monaten habe ich hier ein Dutzend menschliche Proteine vorgestellt. Das ist nur ein winziger Ausschnitt aus dem Sortiment von mindestens 30 000 Eiweißstoffen, über die unser Körper laut Ergebnis des Human-Genom-Projekts verfügt. Dennoch vermittelt er bereits einen Eindruck von der enormen Bedeutung und Vielfalt dieser Stoffklasse. Demnach reicht das Spektrum ihrer Aufgaben von klassischen Enzymfunktionen, wie sie die molekularen „Scheren" Lysozym und Trypsin ausüben, über die Signalweiterleitung durch Hormone (gewähltes Beispiel: Insulin) oder durch Rezeptoren (Rhodopsin) bis hin zur bloßen Bereitstellung von Baumaterial (Kollagen). Proteine fungieren zudem als Spediteure (Hämoglobin), Kraftmaschinen (Myosin) oder Polizei (Antikörper). Ein besonders wichtiges Betätigungsfeld ist schließlich der Umgang mit dem Erbgut, für den ich daher gleich vier Vertreter beschrieben habe. Sie stehen auch deshalb im Brennpunkt wissenschaftlichen Interesses, weil sie teilweise mit der Entstehung (Telomerase) oder Verhütung von Krebs (*p53*) zu tun haben.

Damit sind aber noch längst nicht alle bekannten Proteinfunktionen genannt, und es steht zu erwarten, dass im Zuge der nun anbrechenden Postgenom-Ära viele weitere entdeckt werden. Die Kenntnis der „Buchstabenfolge" oder Sequenz eines Gens allein nutzt ja nicht viel. Sie verrät nur die mutmaßliche Zusammensetzung des zugehörigen Proteins, lässt dessen Aufgabe aber im Dunkeln. Für die große Mehrzahl der neu identifizierten Gene weiß man deshalb noch nicht, wozu sie dienen. Diesem Unwissen abzuhelfen ist die große Herausforderung, vor der die Biowissenschaftler in den nächsten Jahren stehen. Sie dürfte noch weitaus anspruchsvoller sein als die Entzifferung des menschlichen Erbguts selbst.

Wie lässt sich die Funktion eines Gens ermitteln? Als Erstes kann man seine Sequenz mit den unzähligen anderen vergleichen, die in Gen-Datenbanken gespeichert sind. Manchmal finden sich dabei Ähnlichkeiten zu einem Gen, das schon besser erforscht ist. Auf diesem Wege lässt sich oft die Zugehörigkeit zu einer bekannten Gen-Familie feststellen.

Wenn man genauer herausfinden will, was ein bestimmtes Gen macht, muss man es klonieren. Dazu schleust man es in ein Bakterium ein und lässt von diesem das zugehörige Protein in großer Menge herstellen. So erhält man genügend Material für weitere Untersuchungen – etwa die Ermittlung der dreidimensionalen Struktur, die Hinweise auf die Funktion verspricht. Außerdem kann man das Protein auf eventuelle Wechselwirkungen mit anderen Biomolekülen hin testen. Ein Großteil der noch unbekannten Funktionen in menschlichen Zellen spielt sich vermutlich auf der Ebene der Interaktionen zwischen Proteinen oder zwischen diesen und Genen ab. Da existieren vielschichtige Informationsnetzwerke aus Schaltern und Regulatoren, die sich gegenseitig beeinflussen und wesentlich für die Komplexität des menschlichen Organismus verantwortlich sind.

Protein 1 Protein 2 Protein 3 | Protein 4 bindet an Protein 1 | Protein 5 bindet an Protein 2 | Protein 6 bindet an Protein 3 | Protein 7 bindet gar nicht | Protein 4 Protein 5 Protein 6 Protein 7 Proteine 4–7

G. MACBEATH UND S. L. SCHREIBER, SCIENCE, BD. 289, S. 1760

„Protein-Raster" enthüllen Wechselwirkungen zwischen Proteinen. Zu Glasplatten, auf denen jeweils drei Proteine in Form quadratisch angeordneter Tropfen fixiert waren, wurden vier andere Proteine zugefügt, die mit unterschiedlichen Farben markiert waren. Bei Bindung an eines der fixierten Proteine ließen sie dessen Tropfen-Quadrat aufleuchten.

Dass ein Mensch von „nur" 30 000 Genen definiert wird, war eine große Überraschung. Das ist bloß das 50-fache der Ausstattung eines einfachen Bakteriums, und nicht einmal doppelt so viel, wie die Taufliege *Drosophila melanogaster* aufzuweisen hat. Man sollte jedoch bedenken, dass der Komplexitätsgrad eines Organismus keineswegs linear mit der Menge seiner Bausteine ansteigt. Die Wechselwirkungsmöglichkeiten zwischen den Komponenten nehmen vielmehr exponentiell mit deren Anzahl zu. Demnach wären 30 000 Gene, wenn es denn dabei bleibt, ebenso ausreichend wie die vorher geschätzten 50 000 bis 100 000.

In den Zeiten des Internet haben übrigens auch Laien die Möglichkeit, sich auf eigene Faust über den Stand der Erkenntnisse zum menschlichen Erbgut zu informieren. Wie wäre es mit Lysozym, dem ersten Beispiel aus meiner Serie? Wenn Sie die Genomdatenbank besuchen (gdbwww.gdb.org/gdb/), die Optionen „Search all biological data" sowie „by keyword" auswählen und dann in das kleine Suchfenster den englischen Namen „lysozyme" eingeben, erhalten Sie genau einen Treffer mit dem Zugangscode GDB:120160. Klicken Sie darauf, so erscheint eine Seite mit der Übersicht über die verfügbare genetische Information – darunter auch der Hinweis, dass das gesuchte Gen sich auf dem Chromosom Nummer 12 in den Abschnitten p bis q befindet, und dass Mutationen dieses Gens mit der familiären Amyloidose in Verbindung gebracht werden. Ferner gibt es Links zu den vorhandenen Sequenzdaten.

Die zugehörige Aminosäuresequenz findet sich bei Swissprot (www.expasy.ch). Dort stehen auch zahlreiche Publikationshinweise sowie Angaben über medizinisch relevante Variationen und Mutationen des Lysozyms.

Aber wie sieht das Protein denn nun aus? Wenn eine hochaufgelöste Molekülstruktur publiziert worden ist, dann liefert die Protein Data Bank (www.rcsb.org/pdb) ein Bildchen dazu. Bei Lysozym hat man die Qual der Wahl, da Dutzende von Arbeitsgruppen die Struktur dieses Proteins in kristallisierter oder gelöster Form ermittelt haben.

Mit diesen Tipps kann ich das Stillen Ihres Wissensdurstes nun getrost in Ihre Hände legen.

mit den 5,05 Millionen überein, die sich aus dem Sonnenmodell ergeben. Dies ist ein Triumph für die Theorie der Sternentwicklung, und womöglich der spektakulärste Teil der SNO-Resultate. Demnach haben die Astrophysiker die Zentraltemperatur der Sonne von 15,7 Millionen Kelvin auf immerhin 1 Prozent genau berechnet.

Wenn weitere Messungen die Ergebnisse bestätigen, kann das solare Neutrinoproblem als gelöst gelten: Ursache des Defizits vor allem bei hohen Energien sind in der Tat Neutrino-Oszillationen; am Sonnenmodell ist nicht zu rütteln. Die weit reichende Konsequenz heißt dann aber auch, dass Neutrinos eine von null verschiedene Ruhemasse haben. Deren Betrag lässt sich aus Oszillationsexperimenten jedoch nicht bestimmen, da diese nur die Differenz der Massenquadrate zwischen zwei Neutrinoarten anzeigen. Dieser Wert ergab sich für Elektron- und Myon-Neutrinos zu unter einem tausendstel Elektronenvolt zum Quadrat. Die Superkamiokande-Wissenschaftler hatten seinerzeit bei ihren Messungen von Atmosphärenneutrinos eine Differenz der Massenquadrate von Anti-Myon- und -Tau-Neutrinos von etwa fünf tausendstel Elektronenvolt zum Quadrat ermittelt. Das neue Ergebnis für die Sonnenneutrinos ist unter bestimmten Voraussetzungen damit vereinbar.

Der Nachweis einer endlichen Neutrinomasse unterstreicht die Notwendigkeit einer Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik, an der Theoretiker seit langem arbeiten. Seine Konsequenzen sind erheblich; denn an die Stelle des vergleichsweise einfachen Bildes masseloser linkshändiger Neutrinos und rechtshändiger Antineutrinos muss eine deutlich kompliziertere Konstruktion treten, deren mathematische Fundierung manchen Lesern gewiss Freude bereiten wird.

Auch wenn sich die Massenwerte der drei Neutrino-Arten nicht einzeln bestimmen lassen, liefern die Ergebnisse der Superkamiokande- und Sudbury-Experimente – zusammen mit der heutigen Obergrenze von 2,8 Elektronenvolt für die Masse des Elektron-Neutrinos – immerhin einen Schätzwert für ihre Summe: Sie kann nicht größer als 8,4 Elektronenvolt sein. Das dürfte Kosmologen enttäuschen, die gehofft hatten, Neutrinos würden auch das Problem der fehlenden Materie im Universum lösen. Bei so geringen Massewerten können sie keinen wesentlichen Beitrag zur dunklen Materie leisten. ■

Dr. habil. Georg Wolschin *ist Theoretischer Physiker und Wissenschaftsjournalist; er lehrt an der Universität Heidelberg.*

PROTEOMIK

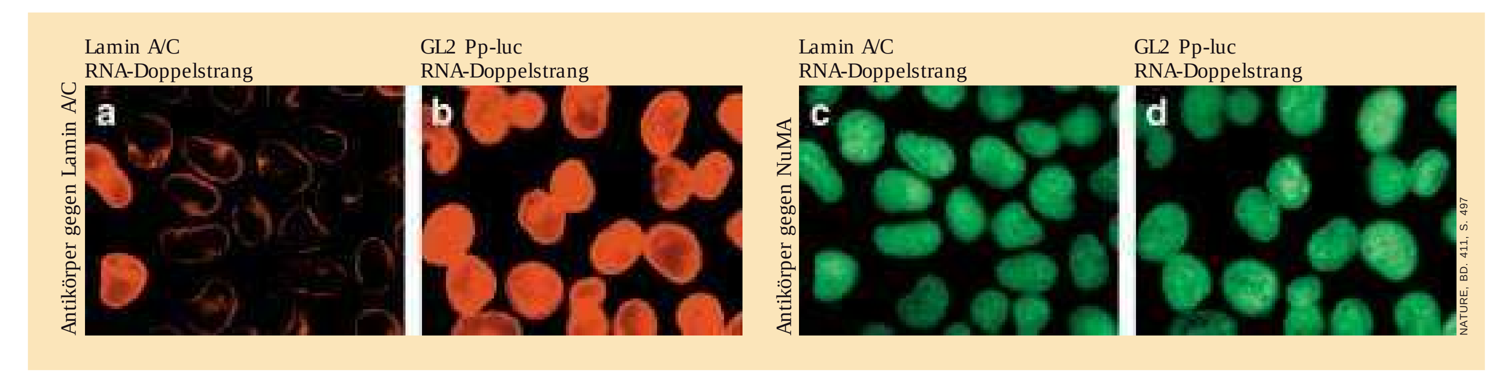
Neues Werkzeug zum Erforschen des Erbguts

Ein Mechanismus, mit dem sich Zellen gegen Virusbefall wehren, hat sich als idealer Hebel erwiesen, um Gene nach Belieben abzuschalten und so ihre Funktion zu erforschen.

Von Michael Groß

Stellen Sie sich folgenden merkwürdigen Traum vor. Sie sitzen in einem Konzert. Ein Orchester mit über 30000 Musikern spielt etwas, das vermutlich Musik sein soll, aber die Vielzahl der Töne und Rhythmen erzeugt nur ein kakophonisches Durcheinander, von dem Ihnen die Ohren dröhnen. Sie können weder einzelne Melodien noch Harmonien, Motive oder Themen heraushören. Weit und breit ist kein Dirigent zu sehen – verschiedene Instrumentengruppen scheinen sich nach mysteriösen Regeln gegenseitig zu beeinflussen. Tausende von Blechbläsern übertönen alle leiseren Instrumente, wenn sie nicht gerade von Dutzenden von Orgeln zugedeckt werden.

Während Sie sich die Ohren zuhalten, scheint Ihr Nachbar verzückt zu lauschen. In seiner Hand hat er ein Gerät, das wie eine Fernbedienung aussieht. Als Sie ihn verwundert anschauen, ▶



Beweis für die gezielte Abschaltung eines Gens durch „RNA-Interferenz“: Menschliche Zellen produzierten das Protein Lamin (rot angefärbt) nicht mehr, wenn Göttinger Forscher ihnen einen 21 Basen langen RNA-Doppelstrang injizierten, dessen Sequenz mit einem Abschnitt des Lamin-Gens übereinstimmte (a). Die Injektion eines anderen 21 Basen langen RNA-Doppelstrangs (GL2 Pp-luc) hatte dagegen keinen Effekt (b). Beide RNA-Doppelstränge hatten auch keinen Einfluss auf die Synthese eines Kontroll-Proteins (NuMA, grün angefärbt; c, d).

reicht er es Ihnen mit aufforderndem Lächeln. Sie nehmen es, drücken wahllos auf einen Knopf, und ein Wunder geschieht. Plötzlich erklingt nur noch die schmeichelnde Melodie einiger schluchzender Geigen. Sie drücken noch einmal, und ein Cello steuert eine schmelzende Begleitung bei. Und so können Sie aus dem wirren Gesamtklang nach Belieben einzelne Instrumente oder Instrumentengruppen herauslösen und gesondert anhören. Allmählich gewinnen Sie auf diese Weise eine Ahnung davon, aus welchen Stücken sich das Klangchaos zusammensetzt.

Eine solche Fernbedienung wäre der Wunschtraum von Forschern, die das Zusammenspiel der 30000 Gene im menschlichen Erbgut ergründen wollen. Doch er muss kein Traum bleiben. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Biophysikalische Chemie in Göttingen haben jetzt immerhin einen Stummschalter entwickelt, der nach Belieben einzelne „Instrumente“ ausblendet. Trotz seiner beschränkten Möglichkeiten könnte er wesentlich dazu beitragen, mehr Klarheit in die unübersichtliche Vielstimmigkeit der menschlichen Gene zu bringen, von denen seit dem Abschluss des Human-Genom-Projekts eine mehr oder weniger komplette Liste vorliegt.

Verdächtiges Virus-Material wird fein säuberlich zerhackt

Bekanntlich hat die Erbsubstanz aller höheren Organismen die Form eines wendeltreppenartigen Doppelstrangs aus DNA-Molekülen (Desoxyribonucleinsäure). Die Treppenstufen bestehen aus Paaren von „Basen“, die in dem Sinne komplementär sind, dass sie wie Nut und Feder zusammenpassen. Die Basen bilden die Buchstaben des genetischen Textes, der die Bauanleitungen für die Eiweißstoffe des Organismus enthält. Zur Herstellung eines Proteins werden zunächst Blaupausen des entsprechenden Gens in Form einer so genannten Boten-RNA (Ribonucleinsäure) angefertigt. Sie wandert zu den Ribosomen, wo sie als Vorlage für den Zusammenbau des zugehörigen Proteins dient.

Anders als die DNA sind Boten-RNAs einzelsträngig. Auf dieser Tatsache beruht ein Verteidigungsmechanismus vieler Lebewesen gegen Viren, der so alt ist, dass er sowohl bei den Insekten als auch bei den Pflanzen vorkommt – bei der Taufliege *Drosophila melanogaster* wurde er ebenso nachgewiesen wie bei der Ackerschmalwand *Arabidopsis thaliana*.

Die Zellen dieser Organismen machen sich zu Nutze, dass das Erbgut der Schädlinge vielfach als doppelsträngige RNA vorliegt, die in einer Zelle normalerweise nicht vorkommt. Findet die Zellpolizei also ein doppelsträngiges RNA-Molekül, mutmaßt sie darin virale Konterbande und schneidet sie in kleine Stücke (etwa 21 Basenpaare lang), um sie unschädlich zu machen. Ein in seinen Einzelheiten noch ungeklärter Mechanismus sorgt anschließend dafür, dass auch jegliche Boten-RNA verschwindet, die dieselbe Information trägt und deshalb vermutlich gleichfalls von dem Virus stammt.

Wahrscheinlich erkennt ein Komplex aus mehreren Proteinen die Doppelstrangfragmente, heftet sich an sie und zerlegt sie in die beiden Einzelstränge. Mit diesen fischt er dann nach Boten-RNAs, die sich auf Grund ihrer komplementären Sequenz mit einem der beiden Stränge zusammenlagern können. Am Ende dürfte ein RNA-abbauendes Enzym (eine Ribonuclease oder kurz: RNase) die unliebsamen Nucleinsäuren verdauen und dem stofflichen Recycling zuführen.

Kürzlich konnten Emily Bernstein und ihre Mitarbeiter am Cold Spring Harbor Laboratory im US-Bundesstaat New York die Ribonuclease identifizieren, die bei der Taufliege die Fremd-RNA erkennt und in kurze Doppelstrangfragmente zerlegt (*Nature, Bd. 409, S. 363*). In Anlehnung an das Küchenwerkzeug zum Kleinhacken von Gemüse nannten sie das Enzym „Dicer“ – der deutsche

(Seiten 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

Ausdruck „Wiegemesser“ klingt leider nicht annähernd so schön. Der Verteidigungsmechanismus selbst erhielt die Bezeichnung RNA-Interferenz.

Ob auch Säugetiere mit dieser Strategie Viren bekämpfen, war allerdings lange Zeit umstritten; es gab dazu widersprüchliche Befunde. Thomas Tuschl und seine Mitarbeiter am Göttinger MPI konnten die Frage jetzt definitiv beantworten, indem sie die an *Drosophila* gewonnenen Erkenntnisse einfach strikt auf Säugerzellen übertrugen. Zugleich entdeckten sie dabei eine ebenso einfache wie vielseitige Methode, gezielt beliebige Gene abzuschalten.

Die Taufliege zerhackt die Doppelstrang-RNA in Bruchstücke mit genau 21 Basenpaaren. Die Göttinger Forscher stellten solche Fragmente künstlich her und gaben ihnen die „Buchstabenfolge“ von bestimmten Reportergenen, die sie in ihre Zellkulturen eingebaut hatten – darunter das Gen für das Leuchtenzym der Glühwürmchen (Luciferase). Nach der Injektion in die leuchtenden Säugerzellen unterdrückten die 21er-Doppelstränge die Ablesung des Luciferase-Gens: Das Glühen ließ messbar nach (*Nature, Bd. 411, S. 494*).

Als Nächstes zeigten Tuschl und seine Kollegen, dass ihr Stummschalter nicht nur mit eingeschmuggelten Reportergenen, sondern auch mit den eigenen Genen der Zelle funktioniert. Dazu verwendeten sie gängige menschliche Zell-Linien, die sich vom Tumor einer längst verstorbenen Krebspatientin ableiten. Sie konnten nachweisen, dass die Herstellung der Proteine Lamin A und Lamin C, die in der Membran des Zellkerns vorkommen, weitgehend unterdrückt wird, wenn die entsprechende Doppelstrang-RNA anwesend ist (Bild links oben).

Gene lassen sich nach Belieben abschalten

Allgemein scheint der Mechanismus bei Säugetieren genauso zu funktionieren wie bei Insekten. Entscheidend ist, dass die eingebrachten künstlichen RNA-Fragmente kürzer sind als dreißig Basenpaare. Oberhalb dieser Länge setzt bei Säugetieren nämlich eine allgemeinere Infektions-Antwort ein, an der das Interferon-System beteiligt ist.

Damit lässt sich nun für jedes beliebige der 30 000 bekannten Gene im menschlichen Erbgut ein künstlicher Dämpfer herstellen und dann in Zellkulturen überprüfen, wie sich die Inaktivierung dieses Gens auf die Eigenschaften der Zelle auswirkt. Da Proteine aus einer Familie oft identische Abschnitte enthalten, kann man sogar ganze Gruppen ausschalten oder unterdrücken. Dazu braucht man weniger als ein Tausendstel der Menge an RNA wie bei der bisher schon angewandten „Antisense“-Methode, die einfach auf der Blockierung der Boten-RNA durch ihren komplementären Gegenstrang beruht.

Zwar werden sich mit diesem Verfahren nicht alle Fragen beantworten lassen, da viele Funktionen von Wechselwirkungen zwischen mehreren Proteinen, wenn nicht gar von der Kommunikation zwischen verschiedenen Zelltypen abhängen; doch dürften die Forscher für einen Großteil der noch rätselhaften menschlichen Gene auf schnelle und kostengünstige Weise elementare Informationen über deren Aufgabe und Bedeutung erhalten. Der neue Schalldämpfer könnte ihnen so schon bald dazu verhelfen, das scheinbare Durcheinander des menschlichen Gen-Orchesters aufzulösen in eine raffinierte Verschachtelung erfreulich harmonischer Konzerte. ■

UMWELTÜBERWACHUNG

Mit transgenen Pflanzen Schwermetallen auf der Spur

Ein neuer Biotest spürt Schwermetalle in Böden und Gewässern schon in äußerst geringer Konzentration auf. Dabei nutzt er aus, dass die Umweltgifte nicht nur die Erbsubstanz schädigen, sondern manchmal auch defekte Gene reparieren.

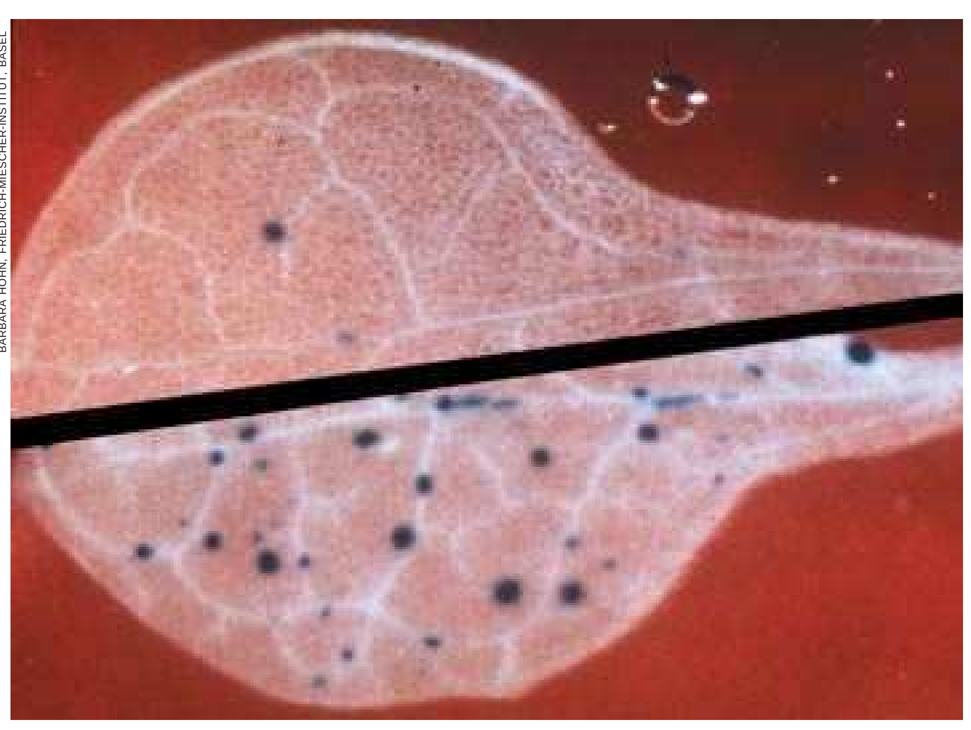
Von Petra Jacoby

Der industriell bedingte Eintrag von Schwermetallen in Böden und Gewässer ist noch immer ein gravierendes Umweltproblem. Die meisten dieser Schadstoffe spielen zwar in niedrigen Konzentrationen als Spurenelemente eine wichtige Rolle beim Aufbau zahlreicher Enzyme. Größere Mengen wirken allerdings toxisch und können viele Erkrankungen bis hin zu Krebs auslösen. Aus diesem Grund sind ständige Gewässer- und Bodenkontrollen unerlässlich.

Exakte chemische Analysen müssen für jedes zu untersuchende Element gesondert durchgeführt werden. Sie sind deshalb aufwendig und teuer. Für regelmäßige Kontrollen im Rahmen des Umweltschutzes braucht man einfachere Alternativen.

Seit einiger Zeit stehen verschiedene so genannte Biotests zur Verfügung, die erhöhte Schwermetallkonzentrationen indirekt über ihre schädliche Wirkung auf Organismen oder kultivierte Zellen nachweisen. Diese Verfahren sind aber oft nicht empfindlich genug und sprechen erst bei Werten an, die oberhalb der für den Menschen gefährlichen Grenze liegen.

Nun haben Olga Kovalchuk und ihre Kollegen am Friedrich-Miescher-Insti- ▶



BARBARA HOHN, FRIEDRICH-MIESCHER-INSTITUT, BASEL

Die blauen Punkte auf dem unteren halben Blatt spiegeln den Schwermetallgehalt des Mediums wider, auf dem die Pflanze 35 Tage gewachsen ist. Die Schwermetalle haben in etlichen Zellen das künstlich eingeführte defekte Gen für ein Enzym repariert, das sich durch eine spezielle Färbung sichtbar machen lässt. Das obere halbe Blatt zeigt das Ergebnis auf schwermetallfreiem Medium. Beide Blätter wurden vor dem Enzymnachweis gebleicht, damit die Blaufärbung besser erkennbar ist.

tut in Basel und an der Staatlichen Medizinischen Akademie in Ivano-Frankivsk (Ukraine) einen relativ einfachen und trotzdem sehr empfindlichen Biotest entwickelt, der mit transgenen Pflanzen arbeitet (*Nature Biotechnology, Bd. 19, S. 568*). Schwermetalle schädigen ab einer gewissen Konzentration das Erbgut: Sie lassen die DNA-Doppelhelix brechen und verursachen den Austausch einzelner „Buchstaben" (Basen) im genetischen Text – so genannte Punktmutationen. In der Regel macht das die betreffenden Gene unbrauchbar.

Für das neue Testverfahren wird nun sozusagen der Spieß umgedreht: Schwermetalle verraten sich dadurch, dass sie über ihre DNA-verändernden Effekte ein künstlich eingebautes defektes Gen per Zufall reparieren. Als Testpflanze verwendeten Kovalchuk und ihre Kollegen die Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana).* In deren Erbgut schleusten sie jeweils eine von zwei fehlerhaften Versionen des Gens für das Enzym β-Glucuronidase ein, das normalerweise nur in Tieren und Bakterien vorkommt.

Bei der einen Variante bestand der Defekt in einer ausgetauschten Base. Wird sie im Verlauf einer Punktmutation durch das richtige Exemplar ersetzt, kann das Gen wieder abgelesen werden. Im anderen Fall besaßen alle Abschnitte des β-Glucuronidase-Gens zwar die richtige Sequenz, waren aber in der falschen Reihenfolge und teilweise doppelt vorhanden. Ein Bruch im DNA-Doppelstrang setzt dann komplizierte Umlagerungsprozesse in Gang, die dazu führen, dass die Genregionen wieder korrekt miteinander verknüpft und überflüssige Anteile ausgeschnitten werden. Auf diese Weise entsteht letztendlich gleichfalls ein funktionsfähiges Gen.

Umweltschutz und Gentechnik können durchaus an einem Strang ziehen

Je mehr Schwermetalle nun eine Testpflanze aufnimmt, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass in einzelnen Zellen solche Rückmutationen stattfinden. Diese Zellen und ihre Abkömmlinge können dann wieder β-Glucuronidase synthetisieren. Nach einem spezifischen Färbeprozess erscheinen sie als blaue Punkte auf den Blättern der Pflanze (Bild auf Seite 21).

Um dieses Testsystem zu prüfen, ließen Kovalchuk und ihre Kollegen die mutierten Pflanzen sowohl auf Nährmedien, die sie mit schwermetallhaltigem Wasser angesetzt hatten, als auch auf Bodenproben aus der Umgebung einer Ölraffinerie wachsen. Die Auswertung nach 35 Tagen zeigte einen deutlichen Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Anzahl blauer Punkte auf den Blättern und dem Schwermetallgehalt des Substrats. Interessanterweise ließ sich neben Cadmium, Kupfer, Blei, Zink und Nickel auch Arsen nachweisen. Dieses Element ist zwar kein Schwermetall, aber gleichwohl ein starkes Umweltgift mit DNA-schädigender Wirkung.

Wie die Experimente ergaben, spricht das *Arabidopsis*-Testsystem schon bei äußerst niedrigen Schadstoffkonzentrationen an. So ließen nur 0,001 Milligramm Cadmium pro Liter Medium die Punktmutationsrate bereits auf das Dreifache ansteigen. Mit dieser Empfindlichkeit schlägt die neue Methode die anderen verfügbaren Biotests um Längen.

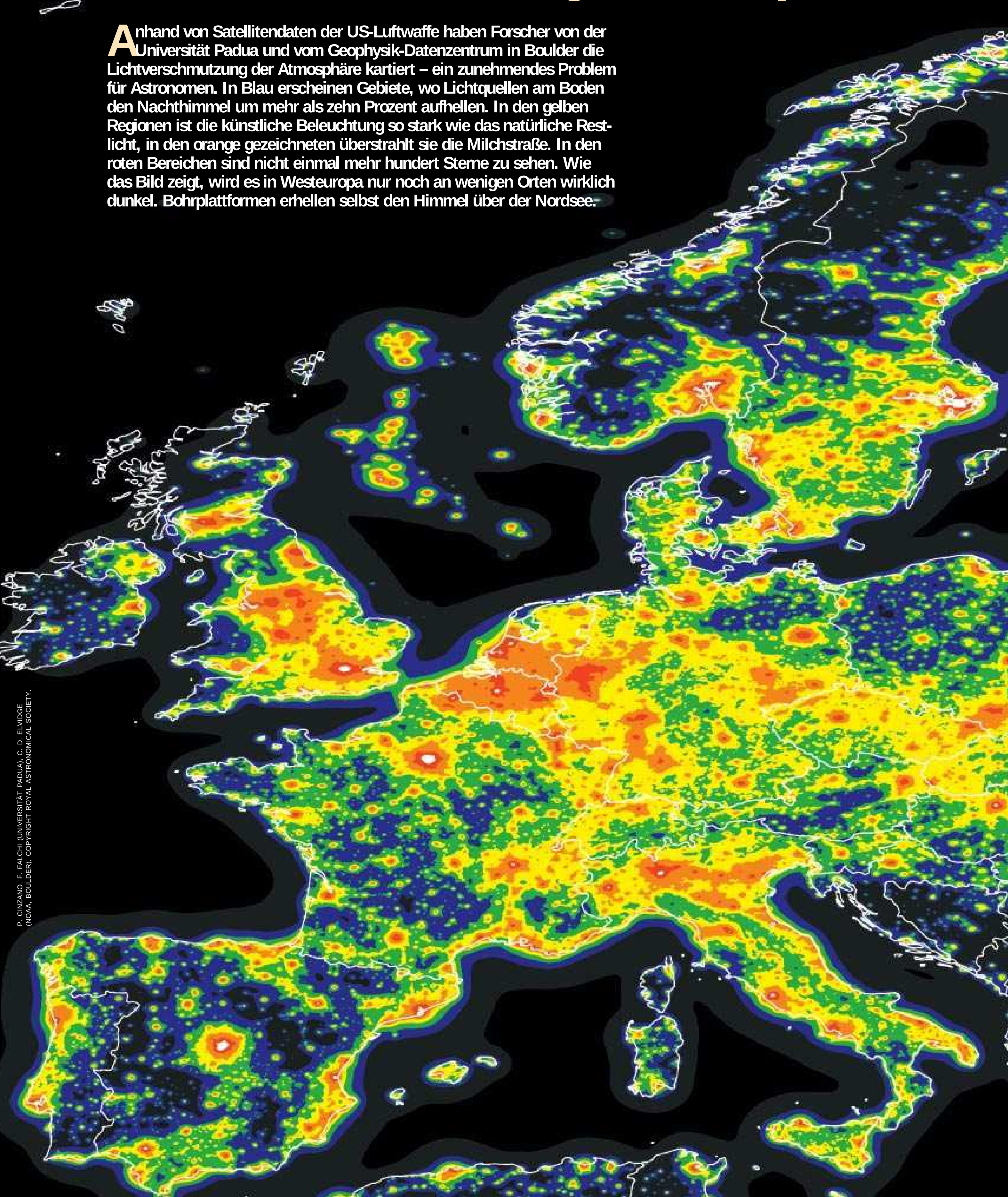
Das hat wahrscheinlich mehrere Gründe. Ein Vorteil ist sicher die Verwendung von Pflanzen als Testorganismen. Sie haben einen festen Standort und nehmen die zu untersuchenden Stoffe daher kontinuierlich auf. So kommt es zu einer im Vergleich zu anderen Biotests relativ langen Einwirkdauer. Außerdem reagieren die Pflanzen im Unterschied zu Bakterien, die bei manchen Verfahren benutzt werden, ähnlich empfindlich auf Schwermetalle wie der Mensch. Und schließlich registriert die geschilderte Methode die Rückmutationen im β-Glucuronidase-Gen in voller Anzahl. Dagegen bleiben bei anderen Methoden, welche die schädliche Wirkung von Schwermetallen auf die DNA ausnutzen, viele Defekte unbemerkt, weil sie keine sichtbaren Auswirkungen haben.

Die transgenen *Arabidopsis*-Pflanzen haben somit das Zeug für einen hoch empfindlichen und trotzdem einfach durchzuführenden Biotest zum Nachweis von Schwermetallbelastungen in Wasser- und Bodenproben. Das Beispiel zeigt, dass Umweltschutz und Gentechnik durchaus an einem Strang ziehen können. ■

Petra Jacoby *ist Diplombiologin und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Wittlich.*

Lichtverschmutzung in Europa

Anhand von Satellitendaten der US-Luftwaffe haben Forscher von der Universität Padua und vom Geophysik-Datenzentrum in Boulder die Lichtverschmutzung der Atmosphäre kartiert – ein zunehmendes Problem für Astronomen. In Blau erscheinen Gebiete, wo Lichtquellen am Boden den Nachthimmel um mehr als zehn Prozent aufhellen. In den gelben Regionen ist die künstliche Beleuchtung so stark wie das natürliche Restlicht, in den orange gezeichneten überstrahlt sie die Milchstraße. In den roten Bereichen sind nicht einmal mehr hundert Sterne zu sehen. Wie das Bild zeigt, wird es in Westeuropa nur noch an wenigen Orten wirklich dunkel. Bohrplattformen erhellen selbst den Himmel über der Nordsee.



Spektrum DER WISSENSCHAFT

Science and Fun

LAUFROBOTER



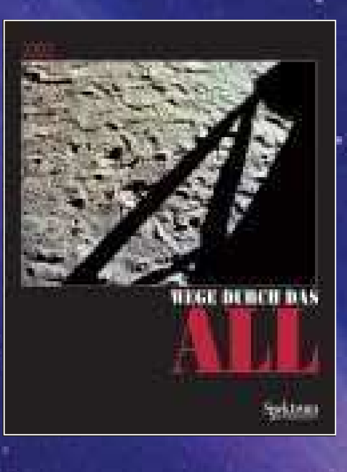
Nach dem Zusammenbauen und dem Einsetzen einer Batterie können Sie „Moon-Walker“ losmarschieren lassen. Sein „elektronisches Gehirn“ ist mit zwei Sensoren ausgestattet, die auf Licht und Geräusche reagieren. Maße 13 × 10 cm, **DM 94,–.**



CD-ROM „DIE ZELLE II“

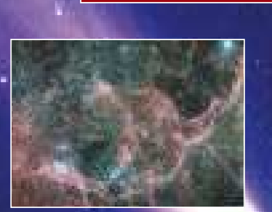
In der Fortsetzung zur ersten CD-ROM steht hier das Mitochondrium und dessen Stoffwechsel im Blickpunkt der Betrachtung. Neben 3D-Modellen und Computeranimationen zeigen fotografische Aufnahmen die strukturellen und funktionellen Besonderheiten. Videoaufnahmen von lebenden Mitochondrien zeigen die hohe Dynamik dieser Zellorganellen; (Mac und PC kompatibel); **DM 69,90**.

KALENDER 2002: WEGE DURCH DAS ALL



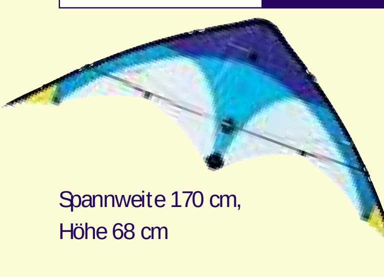
EINE GALAKTISCHE REISE IN 13 BILDERN

Spektrum der Wissenschaft zeigt Ihnen mit diesem Kalender die ganze Vielfalt von Raumfahrt und Astronomie. Lassen Sie sich einladen zu einer Reise, die Sie ein Jahr lang zu 13 außerirdischen Zielen führt. Die Bilder sind hochglanzveredelt und kommen so auf dem matt-schwarzen Hintergrund gut zur Geltung. Auf einem zusätzlichen Blatt finden Sie zu jedem Motiv detaillierte Informationen.



Format: 48 x 60 cm, Spiralbindung; **DM 69,–.**

TRICKDRACHEN „BLUE“



Spannweite 170 cm, Höhe 68 cm

Mit diesem Trickdrachen lassen sich geniale Flugmanöver – auch in Leichtwindgebieten – ausführen. Komplett flugfertig mit Flugschlaufen, Schnur, Köcher und Gebrauchsanleitung; **DM 149,–**.

CD-ROM „RED-SHIFT4“

RedShift 4 basiert auf den neuesten Sternenkatalogen, insbesondere auf dem führenden „Tycho2“-Sternenkatalog. Die CD-ROM enthält ein Astronomielexikon und eine Fotogalerie mit spektakulären Aufnahmen; CD-ROM für Win; **DM 149,-.**

JUNIOR WISSEN

LEGESPIEL „PYTHAGO“

Die 36 kniffligen Aufgaben des Legespiels sind eine Herausforderung an das Auge, die Konzentration und das logische Denkvermögen. „Pythago“ verspricht Spiel- und Rätselspaß für 1-6 Spieler (ab 8 Jahren); **DM 58,-**.







EXPERIMENTIEREN MIT NEUEN TECHNOLOGIEN

EXPERIMENTIERKASTEN „FUTURE TECHNICS“

Im Zentrum dieses neuen Experimentierkastens von Kosmos steht das große, zusammenbaubare Experimentalhaus, in dem viele Versuche stattfinden, vor allem zum aktuellen Thema der erneuerbaren Energien: Solar-, Wind, Bio- und chemische Energie. Mit Geräten zum Selbstbauen: Sonnenofen, Schienenfahrzeug, Segelflugzeug, Akkuladestation.

Der Jugendautor Uwe Wandrey hat alle Experimente ausprobiert und dazu eine spannende Rahmenhandlung geschrieben. Empfohlen ab 12 Jahren. Inhalt: Modellhaus mit Solaranbau, Solarzellen, Warmwasserkollektor, Klimaraum und Kühlschrank, Solarmotor, Thermometer, Sonnenofen, Ölpresse und weitere Teile; **DM 198,–**.

INFORMATIONS- UND BESTELLSERVICE →

GEOLOGIE

Kristalluhr neu gestellt

Sie sind die stabilsten Bestandteile der Erdkruste: Zirkon-Kristalle. Durch ihre Widerstandsfähigkeit bleiben sie erhalten, auch wenn ihr Muttergestein längst erodiert ist. Damit sind Zirkone wichtige Zeugen aus der Frühzeit der Erde. Das gilt umso mehr, als in ihrem Inneren ein atomares Uhrwerk tickt: Das in Spuren enthaltene Lutetium-Isotop der Masse 176 zerfällt mit einer Halbwertszeit von etwa 37 Milliarden Jahren zu Hafnium-176. Folglich lässt sich aus dem Mengenverhältnis der beiden Elemente im Kristall dessen Alter berechnen. Für einige Zirkone ermittelten Geowissenschaftler so einen Wert von 4,2 Milliarden Jahren. Doch nun stellt sich heraus, dass die Uhr langsamer geht als bisher angenommen. Münsteraner Geologen um Klaus Mezger haben sie in neun Monate dauernden Experimenten noch einmal sorgfältig kalibriert. Dazu überprüften sie die Halbwertszeit von Lutetium-176 an Proben, die bereits mit der Uran/Blei-Uhr datiert worden waren. Das Ergebnis: Lutetium zerfällt um vier Prozent langsamer; die ältesten Zirkone sind deshalb sogar 4,4 Milliarden Jahre alt. Dies ändert das Bild von der Urzeit der Erde. Vor knapp 4,6 Milliarden Jahren entstanden, hatte unser Heimatplanet offenbar schon nach 200 statt der bisher angenommenen 400 Millionen Jahre eine feste Gesteinshülle, auf der sich Leben entwickeln konnte. *(Science, Bd. 293, S. 683)*



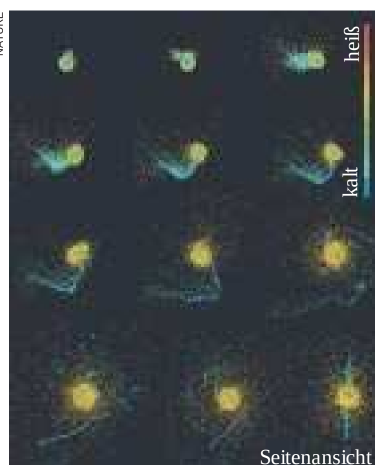
RAINER BODE

Zirkon-Kristalle sind Zeugen aus der Urzeit der Erde.

ASTROPHYSIK

Mond aus tausend Trümmern

Seit über zwanzig Jahren sind sich die Astronomen weitgehend einig, dass der Mond beim Zusammenprall eines etwa marsgroßen Himmelskörpers mit der Erde entstanden ist. Doch bisher gelang es nicht, den Vorgang im Computer zufrieden stellend zu simulieren. Nie passten die Gesamtenergie von Erdrotation und Mondbewegung zur nötigen Einschlagsgeschwindigkeit des fremden Himmelskörpers und der Zusammensetzung des Mondes. Jetzt erst konnten Forscher der Universität von Arizona in Tempe das Problem lösen. Wie andere Arbeitsgruppen verwendeten sie ein Näherungsverfahren, das die beiden kollidierenden Objekte im Computer in kleine Teile zerlegt und die Wechselwirkungen dazwischen berechnet. Während früher jedoch bei maximal 3000 solcher Bruchstücke die Rechenkapazität erschöpft war, konnten Robin Canup und Erik Asphaug mit leistungsfähigeren Computern und Simulationsprogrammen den Vorgang mit mehr als 20 000 Elementen modellieren. Die Simulation muss die Stoßwellen beim Aufprall, die Gravitation jedes einzelnen Elements sowie die verschiedenen Aggregatzustände der teilweise verdampfenden Materie berücksichtigen. Und siehe da: Bei der höheren Auflösung verschwanden die Widersprüche zwischen Modell und Wirklichkeit. *(Nature, Bd. 412, S. 694 und 708)*



NATURE

Simulierte Mondentstehung

ARCHÄOLOGIE

Grabschatz eines Skythenfürsten entdeckt



DEUTSCHES ARCHÄOLOGISCHES INSTITUT

Das Goldpferdchen aus dem Grab von Arzan verkörpert den typischen Tierstil der Skythen.

Als das deutsch-russische Archäologen-Team Anfang Juli die letzte Schicht Lärchenholz-Balken über dem Grab in der Hochebene von Arzan in Sibirien wegräumte, bot sich ein atemberaubender Anblick: Da lagen zwei menschliche Skelette mit rund 6000 wertvollen Grabbeigaben – goldene Panterfiguren zum Kleiderschmuck, Schuhe, ein Köcher, vergoldete Pfeilspitzen, unzählige Perlen und ein fast drei Kilogramm schwerer Halsreif mit Tierornamenten. Die Archäologen halten die Toten für ein skythisches Fürstenehepaar, das vor über 5000 Jahren lebte. Es handle sich um das reichste Grab dieser Volksgruppe, das bisher östlich des Urals entdeckt wurde, sagte Hermann Parzinger vom Deutschen Archäologischen Institut, der bei der Graböffnung zugegen war. Die Forscher sind vor allem vom Stil der Kunstgegenstände begeistert. Fundstücke aus skythischen Gräbern in der Ukraine waren bislang immer griechisch beeinflusst. In diesem Fall handelt es sich nach dem ersten Eindruck um einen rein skythischen Stil, in dem Tiermotive dominieren. Obwohl Frauen in der Gesellschaft der Skythen einflussreiche Positionen innehatten, war das Schicksal der Fürstengattin von Arzan mit dem ihres Mannes verknüpft: Sie wurde sehr wahrscheinlich geopfert, als er starb.

SOZIOLOGIE

Ende der Bevölkerungsexplosion in Sicht

Das rasante Wachstum der Weltbevölkerung stellt eine der größten Bedrohungen für die Zukunft der Menschheit dar. Doch nun geben Wissenschaftler Entwarnung. Mit 85-prozentiger Wahrscheinlichkeit wird die Bevölkerungsexplosion bis Ende dieses Jahrhunderts zum Stillstand kommen, und mit 15-prozentiger Wahrscheinlichkeit leben dann sogar bereits weniger Menschen auf der Erde als heute. Dies ist das Resultat einer Studie des Internationalen Instituts für Angewandte Systemanalyse in Laxenburg (Österreich). Die Forscher haben Fehler bei vergangenen Voraussagen analysiert und ihre Prognoseinstrumente entsprechend weiterentwickelt. Zudem griffen sie auf aktuelle Daten des US-amerikanischen National Research Council zurück. Wie jede Prognose, die einen so langen Zeitraum umfasst, ist allerdings auch diese mit Vorsicht zu betrachten. Schon geringe Irrtümer bei den Annahmen können große Fehler nach sich ziehen. Außerdem gilt: Auch wenn die neue Vorhersage zutrifft, lösen sich nicht alle Probleme, die mit der Überbevölkerung zusammenhängen, von selbst. Zum einen wächst die Zahl der Menschen in bestimmten Regionen wie Afrika und Teilen Asiens schneller als anderswo – und der Anstieg hält auch noch länger an. Zum anderen ergibt sich eine ungünstige Altersstruktur. Während heute 10 Prozent der Menschen über 60 Jahre alt sind, könnten es 2100 schon 34 Prozent sein. *(Nature, Bd. 412, S. 543)*

BIOLOGIE

Schafe schütteln für Senioren

Knochenschwund wird im All und im Alter zum Problem. Eine mögliche Vorbeugungsmaßnahme haben Clinton Rubin und Kollegen an der Staats-Universität von New York nun bei einem ausgefallenen Experiment entdeckt: Sie schüttelten Schafe, um herauszufinden, ob sanfte Vibrationen die Knochen kräftigen. Dazu stellten sie die Tiere ein Jahr lang an fünf Tagen in der Woche jeweils für 20 Minuten auf eine mit hoher Frequenz vibrierende Plattform. Anschließend untersuchten sie die Oberschenkelknochen per Computer-Tomographie. Ergebnis: Das schwammartige Stützgewebe im Knochen-Inneren war bei den geschüttelten Schafen um 32 Prozent dichter als bei einer Kontrollgruppe, die während des Versuchszeitraums nur brav auf der Weide stand. Dass sich der Knochenbau mechanischen Belastungen anpasst, war bekannt. Bisher glaubte man jedoch, die einwirkenden Kräfte müssten vier- bis sechshundertmal stärker sein, wie etwa beim Rennen oder Tragen von Lasten. Dass Knochen auch auf leichte Stimulation reagieren, könnte neue Therapien für Osteoporose-Patienten eröffnen. Einmal rütteln täglich ist einer älteren Dame – der Hauptrisikogruppe für den Knochenschwund – schließlich eher zuzumuten als Dauerlauf oder Gewichtheben. *(Nature, Bd. 412, S. 603)*



CLINTON RUBIN

Schafe im Schüttler

PALÄONTOLOGIE

Donald Ducks frühe Vettern

Nicht alle Dinosaurier waren „schreckliche Echsen“, wie ihr Name unterstellt. Da gab es auch ganz harmlose Vertreter. Ein Musterbeispiel dafür sind, wie Mark Norell vom American Museum of Natural History und seine Kollegen nun herausfanden, Mitglieder aus der Gruppe der Ornithomimiden, wörtlich „Vogelnachahmer“. Die etwa zwei Meter hohen und vier Meter langen, straußenähnlichen Tiere zählen zwar zu den Theropoden und damit zur Verwandtschaft des berüchtigten *Tyrannosaurus rex*, besaßen aber nur einen zahnlosen „Schnabel“ und ernährten sich ähnlich wie Wasservögel: Sie „gründelten“, wühlten also im Schlick am Boden von Gewässern nach kleinen wirbellosen Tieren und Algen. Norell und seine Kollegen untersuchten die Mundhöhle zweier versteinerter Exemplare, von denen eines erst letztes Jahr ausgegraben worden war. Dabei fanden sie die Ansätze lamellenartiger Keratin-Strukturen, die offensichtlich dazu dienten, schlammiges Wasser durchzusieben. Bei einem der beiden Saurier entdeckten die Forscher auch Anzeichen dafür, dass die Schnäbel mit zahlreichen Nervenbahnen versorgt waren. Mit deren Hilfe stöberten die Tiere wohl die Leckerbissen im Schlamm auf. (*Nature, Bd. 412, S. 873*)

AMERICAN MUSEUM OF NATURAL HISTORY

Im zahnlosen „Schnabel“ von *Gallimimus bullatus* (oben) finden sich Reste eines Filters aus Keratin.

NEUROPHYSIOLOGIE

Drogenresistente Mäuse

Normale Mäuse werden ganz schnell zu Junkies, wenn sie die Möglichkeit haben, sich selbst Kokain zu verabreichen. Doch die Tiere von Christian Chiamulera und seinen Kollegen aus den Labors des britischen Pharmakonzerns GlaxoSmithKline widerstehen jeder Versuchung. Abgesehen davon, dass sie keinerlei Interesse an Kokain-Injektionen haben, reagieren sie auf die erzwungene Gabe auch nicht mit der für andere Mäuse typischen Hyperaktivität. Was macht sie so gleichgültig gegen Drogen? Der Grund ist überraschend einfach: Ihnen fehlt eine bestimmte Bindestelle für Glutamat – einen der Neurotransmitter (Botenstoffe), die Nervensignale im Gehirn übermitteln. Dieser so genannte mGluR5-Rezeptor spielt offenbar eine entscheidende Rolle bei der Entstehung der Kokainsucht. Er könnte daher Ansatzpunkt für eine Therapie beim Menschen sein. Chiamuleras Mäuse stellen außerdem die gängige Vermutung in Frage, dass dem Neurotransmitter Dopamin bei der Suchtentstehung eine Schlüsselfunktion zukommt. Gegen diese Annahme spricht, dass bei Mäusen ohne den mGluR5-Rezeptor eine Kokain-Spritze den Dopaminspiegel im Gehirn ebenso ansteigen lässt wie bei normalen Nagern. *(Nature Neuroscience, Bd. 4, S. 873)*

Kosmisches Eis

Wiege des Lebens?

Eis in seiner uns vertrauten Form ist lebensfeindlich. Doch eine exotische Variante im Weltall kann die Bildung organischer Moleküle fördern – und hat vielleicht den Grundstein für das Leben auf der Erde gelegt.

Von David F. Blake und Peter Jenniskens

Als die Raumsonde Voyager 1 vor elf Jahren das Sonnensystem verließ, richteten die Nasa-Ingenieure die Bord-Kamera für einen letzten Schnappschuss auf die Erde. Zu sehen war nur noch ein winziger Punkt, der wegen der Streuung des Sonnenlichts in den riesigen Ozeanen blassblau erschien. In der Tat ist die Erde ein Wasserplanet. Wie weit Forscher auch um den Globus reisen und wie hoch oder tief sie ihre Messgeräte platzieren – überall wo sie auf flüssiges Wasser stoßen, finden sie irgendeine Form von Leben, das an diese spezielle Umgebung angepasst ist.

Wasser hat jedoch auch eine weniger erfreuliche Kehrseite. Bildet es im flüssigen Zustand die Voraussetzung für Leben, so ist es in fester, kristalliner Form sein schlimmster Feind. Organismen können in Geysiren hausen, sich in Salzlaken tummeln und in Säuren baden, aber gegen Eis in ihrem Inneren sind sie machtlos. Wenn Wasser gefriert, treibt die exakte Ordnung der Moleküle in den Kristallen gelöste Substanzen aus, und die scharfkantigen Eispartikeln zerreißen organisches Material unwiederbringlich. Zumindest gilt das für die Erde.

In den Weiten des interstellaren Raums aber ist eine ungewöhnliche Art von gefrorenem Wasser allgegenwärtig, das ganz andere Eigenschaften hat. Es kann jene Art von einfachen organischen Verbindungen beherbergen, aus denen das Leben hervorgegangen ist – und es erleichtert möglicherweise sogar deren Bildung. Demzufolge könnte interstellares Eis wesentlich an der Entstehung der ersten Organismen mitgewirkt haben.

Hinter der Frage nach dem Ursprung des Lebens steckt immer auch die nach der Herkunft der kohlenstoffhaltigen Substanzen, die seine Wegbereiter gewesen sind. Seit mehr als einem Jahrzehnt ist bekannt, dass organische Moleküle in interstellaren Wolken und Kometen vorkommen. Wissenschaftler gelangten außerdem zu dem Schluss, dass eine gefrorene Masse, die große Mengen Wassereis enthält, überall dort im Weltraum existiert, wo Staub und Gas tief genug abgekühlt werden, um zu Festkörpern zu kondensieren. In erster Linie sind das kalte Molekülwolken.

STECKBRIEF

Eis tritt wegen der speziellen Bindungen, die Wassermoleküle mit ihren Nachbarn eingehen, in einer Vielzahl unterschiedlicher Formen auf. In der kristallinen Variante, die natürlicherweise auf der Erde vorkommt, sind diese Wasserstoffbrücken starr fixiert. Bei Bestrahlung mit Ultraviolettlicht, das im tiefen Weltraum allgegenwärtig ist, können sie sich jedoch umlagern.

Anders als gefrorenes Wasser aus unserem Alltag kann das kosmische Eis deshalb Fremdsubstanzen lösen und sie als Reaktionspartner zusammenbringen. So sind vermutlich in den Weiten des Alls grundlegende organische Moleküle entstanden und dann mit Kometen auf die Erde gelangt.

Organische Moleküle aus dem All

Viele Planetenforscher gehen noch einen Schritt weiter. Ihrer Ansicht nach sind die im Eis gebundenen organischen Stoffe im Huckepackverfahren auch zur Erde gelangt. Als vor 4,5 Milliarden Jahren eine kalte Molekülwolke in sich zusammenstürzte und dabei unser Sonnensystem bildete, habe sich ein Teil des enthaltenen Eises mitsamt etwas Staub zu Kometen zusammengeballt. Diese „schmutzigen Schneebälle“ könnten dann mit der noch jungen Erde kollidiert sein und ihre organischen Verbindungen darauf deponiert haben. So entstand jene „Ursuppe“ auf unserem Planeten, in der sich schließlich die ersten primitiven Lebensformen entwickelten.

Auch nach der Entdeckung organischer Substanzen im interstellaren Raum blieb allerdings unklar, wie sie dort entstehen. Untersuchungen von Wasser bei Temperaturen in der Nähe des absoluten Nullpunkts (wo jegliche Molekularbewegung zum Stillstand kommt) haben kürzlich jedoch die Antwort verraten. Danach gaben minimale Änderungen in der Struktur von Eis den Anstoß für den Zusammenschluss von Kohlenstoff, Stickstoff und weiteren ▶



Dunkle Gas- und Staubwolken in Nebeln wie NGC1999 im Sternbild Orion sind die größten Eiskammern im Weltraum.

NASA UND THE HUBBLE HERITAGE TEAM

biologisch unverzichtbaren Elementen zu ersten organischen Verbindungen.

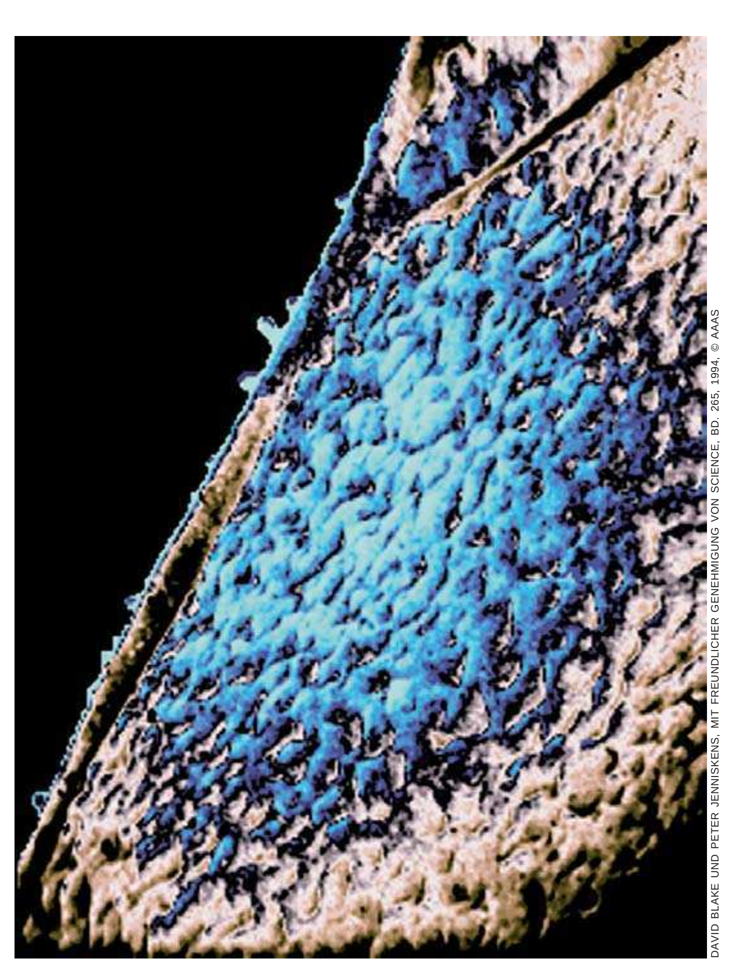
Auch unser Team am Ames-Forschungszentrum der Nasa spürte den geheimnisvollen und überraschenden Eigenschaften von interstellarem Eis nach. Dabei fanden wir bestätigt, dass es – wissenschaftlich gesagt – amorph ist: Es weist keine nennenswerte molekulare oder atomare Ordnung auf und hat folglich auch keine Kristallflächen mit definierten Kanten und Ecken. Einem Weltraumreisenden erschiene es so durchsichtig wie Fensterglas.

Die meisten Festkörper kommen in der Natur in Form von Kristallen vor, in denen die Atome oder Moleküle in einem regelmäßigen Gitter angeordnet sind. Wenn manche Flüssigkeiten rasch abgekühlt werden, bleibt den herumschwirrenden Teilchen jedoch nicht genug Zeit, die vorgesehenen Plätze einzunehmen. Die Schmelze erstarrt dann in einem amorphen Zustand. Das bekannteste Beispiel dafür ist Glas, bei dem es sich, grob betrachtet, um eine nicht-kristalline Form von Quarz handelt.

Bei flüssigem Wasser funktioniert der Trick mit dem Abschrecken allerdings nicht. Es kristallisiert, auch wenn man es sehr schnell abkühlt. Darum wurde amorphes Eis erst 1935 entdeckt, als Forscher den Festkörper untersuchten, der sich beim langsamen Abscheiden von Wasserdampf im Vakuum bildet.

Sogar viele Nichtchemiker wissen, dass Wasser eine Verbindung aus einem Sauerstoff- und zwei Wasserstoffatomen ist. Seine große biologische Bedeutung aber beruht darauf, dass das Sauerstoffatom zwei keulenartig vorspringende Elektronenpaare hat, die schwache Bindungen mit den leicht positiv geladenen Wasserstoffatomen benachbarter Wassermoleküle eingehen können. Diese so genannten Wasserstoffbrückenbindungen verknüpfen auch die Moleküle von flüssigem Wasser schon zu lockeren Aggregaten. Unterhalb des Gefrierpunkts sorgen sie dann für die exakte Anordnung der Wassermoleküle in Reih und Glied.

Welche Kristallstruktur dabei angenommen wird, hängt unter anderem von Druck und Temperatur ab. Man kennt nicht weniger als zwölf Formen von kristallinem Eis, aber nur eine einzige – die hexagonale – kommt natürlicherweise auf der Erde vor. Die Sauerstoffatome bilden darin ein Muster mit sechsfacher Drehsymmetrie, das sich in der Gestalt von Schneeflocken wieder findet. Bei Temperaturen deutlich unterhalb des Gefrierpunkts können sich die Sauerstoffatome dagegen in einem würfelförmigen Gitter anordnen.



DAVID BLAKE UND PETER JENNISKENS, MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON SCIENCE, BD. 265, 1994, © AAAS

Diese mikroskopisch dünne Schicht aus amorphem und kubischem Eis (blau) entstand, als Forscher einen wenige hundert Moleküle dicken, extrem kalten Eisfilm in einem Tieftemperaturmikroskop auf 183 Kelvin (–90 Grad Celsius) erwärmten.

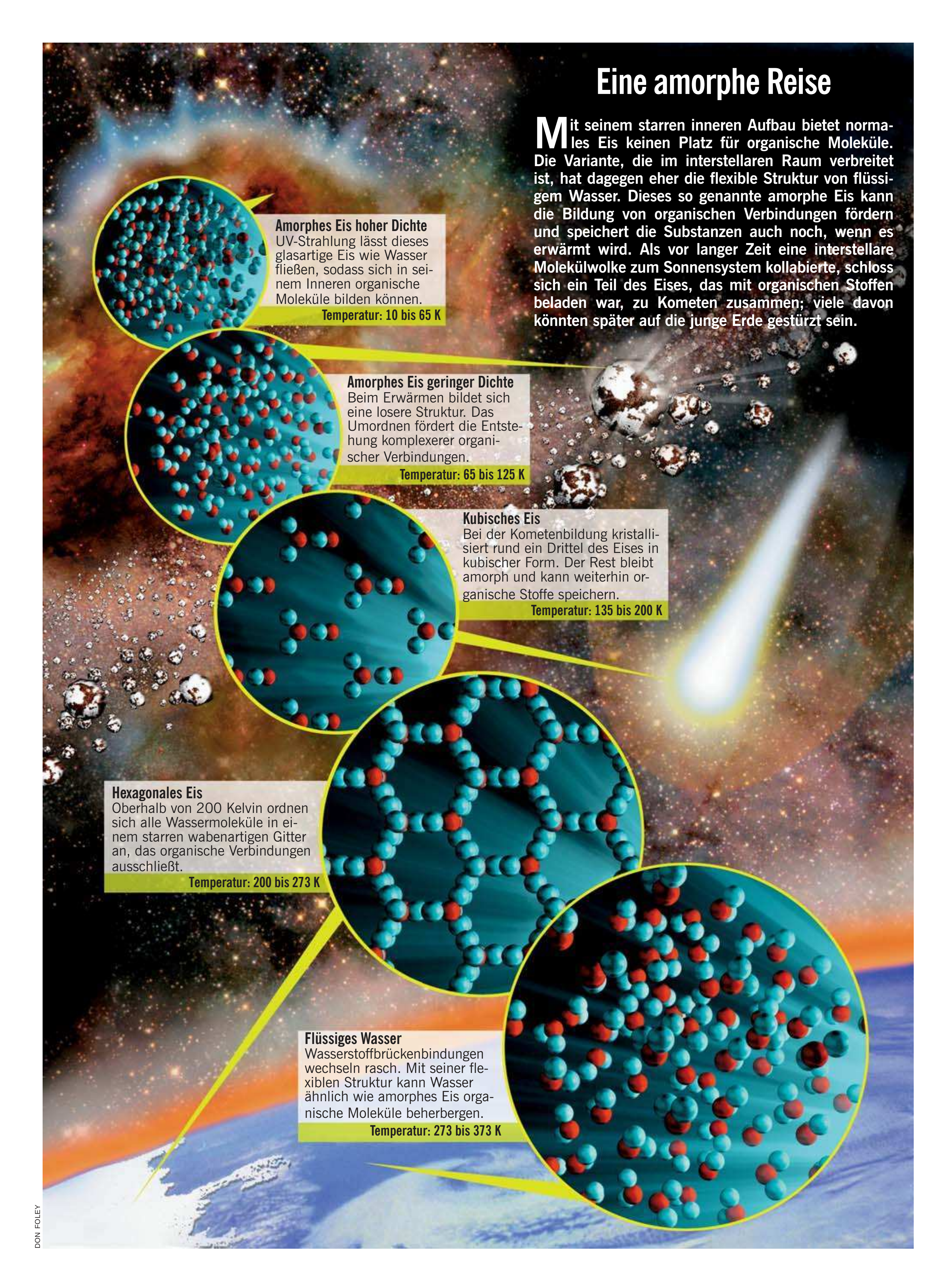
Ultrakaltes Eis kann wie Wasser fließen

Während die Wasserstoffbrückenbindungen in kristallinem Eis fixiert sind, werden sie in flüssigem Wasser ständig in raschem Wechsel gelöst und neu geknüpft. Dieser Unterschied ist für das Entstehen von Leben entscheidend. Die flexible Umordnung der Bindungen befähigt flüssiges Wasser, seine innere Struktur an die physikalischen und chemischen Erfordernisse von Organismen anzupassen. So wie eine Gasblase in Wasser, nicht aber in festem Eis aufsteigen kann, müssen organische Moleküle in der Lage sein, sich zwischen Wassermolekülen zu bewegen. Das erst ermöglicht ihnen, sich zu komplexeren Verbindungen zusammenzuschließen.

Auch in amorphem interstellarem Eis sind die Wasserstoffbrückenbindungen nicht starr fixiert. Darauf beruht seine vielleicht faszinierendste Eigenschaft: Selbst bei einer Temperatur dicht über dem absoluten Nullpunkt (–273,15 Grad Celsius oder 0 Kelvin) kann es fließen, wenn es mit ultraviolettem Licht bestrahlt wird, das im tiefen Weltraum allgegenwärtig ist. Durch diese Eigenschaft vermag interstellares Eis ebenso wie flüssiges Wasser die Entstehung von organischen Verbindungen zu fördern.

Auf deren Spur kamen Wissenschaftler in den frühen siebziger Jahren, als sie die Chemie in den Zentren kalter Molekülwolken im interstellaren Raum erforschten. Damals führten J. Mayo Greenberg von der Universität Leiden (Niederlande) und Louis J. Allamandola vom Ames-Forschungszentrum bahnbrechende Untersuchungen durch. Demnach bestehen bis zu zehn Prozent des Volumens von interstellaren Eiskörnern aus einfachen Molekülen wie Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Methanol und Ammoniak.

Seither konnten Astronomen mehr als hundert verschiedene organische Verbindungen in kalten Molekülwolken nachweisen. Das gelang mit speziellen Teleskopen für Infrarot- und Submillimeter-Strahlung, die von Staub und Gas weniger zurückgehalten wird als gewöhnliches Licht. Die Wissenschaftler verglichen Infrarotspektren von Wolken im Weltraum mit solchen von „interstellarem Eis“, das sie im Labor hergestellt ▶


Eine amorphe Reise
Mit seinem starren inneren Aufbau bietet normales Eis keinen Platz für organische Moleküle. Die Variante, die im interstellaren Raum verbreitet ist, hat dagegen eher die flexible Struktur von flüssigem Wasser. Dieses so genannte amorphe Eis kann die Bildung von organischen Verbindungen fördern und speichert die Substanzen auch noch, wenn es erwärmt wird. Als vor langer Zeit eine interstellare Molekülwolke zum Sonnensystem kollabierte, schloss sich ein Teil des Eises, das mit organischen Stoffen beladen war, zu Kometen zusammen; viele davon könnten später auf die junge Erde gestürzt sein.
Amorphes Eis hoher Dichte
UV-Strahlung lässt dieses glasartige Eis wie Wasser fließen, sodass sich in seinem Inneren organische Moleküle bilden können.
Temperatur: 10 bis 65 K
Amorphes Eis geringer Dichte
Beim Erwärmen bildet sich eine losere Struktur. Das Umordnen fördert die Entstehung komplexerer organischer Verbindungen.
Temperatur: 65 bis 125 K
Kubisches Eis
Bei der Kometenbildung kristallisiert rund ein Drittel des Eises in kubischer Form. Der Rest bleibt amorph und kann weiterhin organische Stoffe speichern.
Temperatur: 135 bis 200 K
Hexagonales Eis
Oberhalb von 200 Kelvin ordnen sich alle Wassermoleküle in einem starren wabenartigen Gitter an, das organische Verbindungen ausschließt.
Temperatur: 200 bis 273 K
Flüssiges Wasser
Wasserstoffbrückenbindungen wechseln rasch. Mit seiner flexiblen Struktur kann Wasser ähnlich wie amorphes Eis organische Moleküle beherbergen.
Temperatur: 273 bis 373 K

DON FOLEY

hatten. Dabei konnten sie ihre Vorstellungen über den Ursprung der organischen Verbindungen im All präzisieren. Diese mussten großenteils in Eisschichten entstanden sein, die auf einem Kern aus Silicat oder Kohlenstoff aufgefroren waren. In dichten Molekülwolken sind solche vereisten Staubkörner nicht größer als ein zehntausendstel Millimeter.

Zunächst blieb allerdings unklar, durch welche chemischen Reaktionen sich die organischen Moleküle im All gebildet haben könnten. Die Bedeutung der ungewöhnlichen Eigenschaften von interstellarem Eis für die Synthese von Kohlenstoff-Verbindungen wurde erst 1993 deutlich, als wir im Labor für Weltraummikroskopie am Ames-Forschungszentrum mit der Untersuchung jener Eisformen begannen, die ausschließlich bei niedrigen Drücken auftreten. Dazu froren wir Wasserdampf in einem geeignet modifizierten Tieftemperatur-Elektronen-Transmissions-Mikroskop aus (siehe Bild rechts). Auf diese Weise ließen sich in dem Gerät nur wenige hundert Moleküle dicke Eisfilme erzeugen. Um Änderungen ihrer Gestalt und Struktur zu beobachten, nahmen wir, während wir sie aufwärmten oder abkühlten, Bilder der Proben mit hoher Vergrößerung sowie Elektronenbeugungsmuster auf.

Bei hinreichend tiefen Temperaturen (unter 30 Kelvin) und genügend langsamer Abscheidung (weniger als 0,1 Millimeter pro Stunde) bildete sich ein amorpher Festkörper, der den Strukturen von interstellarem Eis sehr ähnlich war, wie sie aus Infrarotspektren abgeleitet wurden. Er wies eine besondere Struktur mit hoher Dichte auf, die zuvor nur von einem Röntgenbeugungsexperiment aus dem Jahre 1976 bekannt war. Wir fanden bestätigt, dass Wasserdampf, den man bei etwa 14 Grad über dem absoluten Nullpunkt abscheidet, eine andere amorphe Struktur hat als ein Film, der bei 77 Kelvin aufgedampft wird. Tatsächlich konnten wir beim langsamen Erwärmen des Eises den Übergang von der Tief- in die Hochtemperaturform verfolgen. Das Beugungsmuster der ersteren ließ sich am besten durch die Annahme erklären, dass sich einige Wassermoleküle in unregelmäßige Hohlräume zwängen, welche die Nachbarmoleküle bilden. Dadurch werden die Sauerstoffatome sehr eng gepackt, und es entsteht amorphes Eis hoher Dichte. Mit 1,1 Gramm pro Kubikzentimeter liegt sein spezifisches Gewicht etwa 15 Prozent über dem von gewöhnlichem Eis.

Mit Kometen huckepack zur Erde

Wir bestätigten auch Ergebnisse, die Hans Günther Heide 1984 am Berliner Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft gewonnen hatte. Der deutsche Forscher schoss seinerzeit sehr energiereiche Elektronen auf amorphes Eis hoher Dichte. Dieses änderte während der Bestrahlung unablässig seine Struktur und begann regelrecht zu fließen. Einzige Voraussetzung: Das Bombardement mit Elektronen musste bei Temperaturen unter 30 Kelvin stattfinden.

Im interstellaren Eis können sich biologisch wichtige Elemente zu organischen Verbindungen zusammenschließen

Die Entdeckung, dass amorphes Eis flüssigem Wasser ähnlicher ist als gefrorenem, war eine Riesenüberraschung. Die meisten Wissenschaftler hatten zuvor angenommen, dass alle Formen von Wassereis bei Temperaturen unterhalb von etwa fünfzig Kelvin ihren inneren Aufbau strikt beibehalten. Wie Heide jedoch herausfand, wandelt sich derart kaltes Eis beim Beschuss mit Elektronen unabhängig von seiner ursprünglichen Struktur in die amorphe Form hoher Dichte um. Andere Forscher entdeckten später, dass Ultraviolett-Strahlung, der kalte Molekülwolken häufig ausgesetzt sind, denselben Effekt haben.

Demnach sollte interstellares Eis überwiegend in der amorphen Hochdichte-Form vorliegen. Die unregelmäßig zusammengezwängten Wassermoleküle in dieser Struktur ermöglichen eingeschlossenen Fremdatomen oder -molekülen eine gewisse Beweglichkeit. Auf diese Weise können sich die biologisch wichtigen Elemente Kohlenstoff, Sauerstoff und Stickstoff begegnen und zu organischen Verbindungen zusammenschließen. Außerdem haben verschiedene Untersuchungen gezeigt, dass bei Bestrahlung von amorphem Eis hoher Dichte mit energiereichen Teilchen oder Lichtquanten Fremdmoleküle wie Kohlenmonoxid oder Ammoniak in hochreaktive Fragmente – so genannte Radikale – aufgespalten werden. Diese können dann im Eis umherwandern, bis sie auf andere reaktive Teilchen treffen, und sich mit ihnen verbinden.

Damit hatten wir einen plausiblen Mechanismus für den Ursprung von organischen Verbindungen in interstellarem Eis gefunden. Als Nächstes stellte sich nun die Frage, wie diese Stoffe unversehrt auf die Erde gelangen konnten. Die geeignetsten Tiefkühltransporter sind Kometen – Überbleibsel der Eisbrocken, die sich beim Gravitationskollaps der kalten Molekülwolke bildeten, aus der unser Sonnensystem entstand. In der Nähe der jungen Sonne herrschten so hohe Temperaturen, dass fast alle Elemente und Verbindungen in Gasform vorlagen. In den kühleren Gebieten außerhalb der Umlaufbahn von Jupiter dagegen könnten amorphes Eis und die in ihm erzeugten organischen Verbindungen erhalten geblieben sein, als sich der Staub zu Kometen und anderen kleinen Körpern verband.

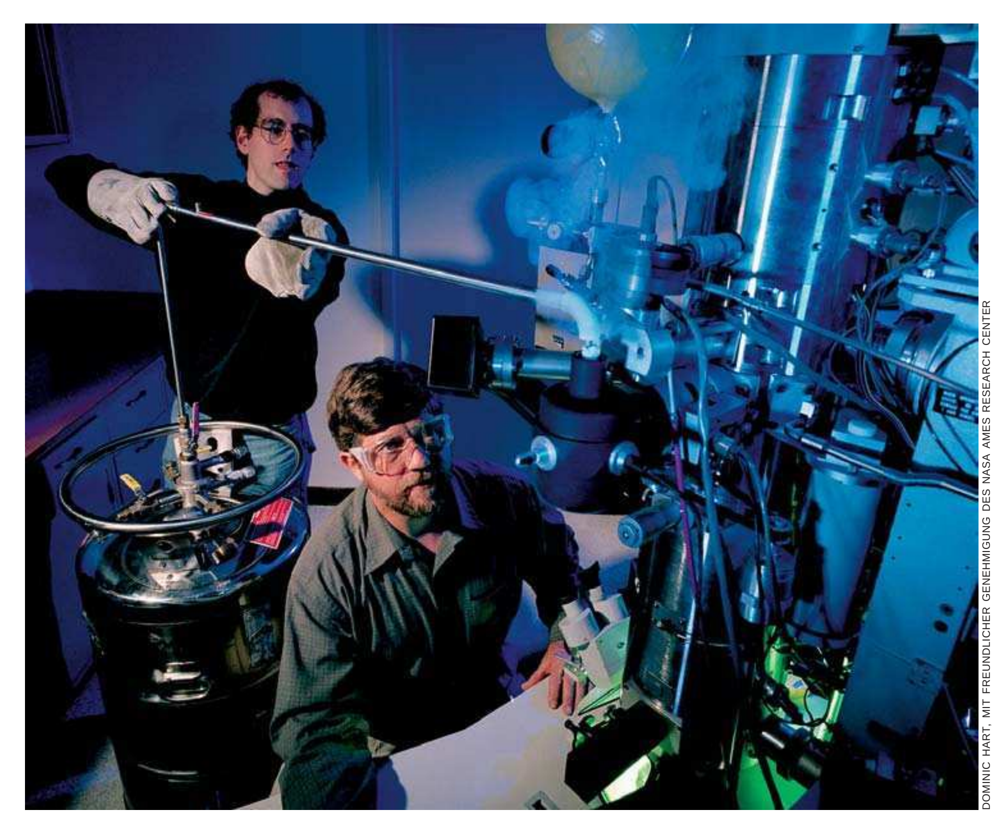
Selbst heute liegt ein Großteil des Wassereises in Kometen noch in amorpher Form vor. Darauf deuten Untersuchungen des Schweifs hin, den die schmutzigen Schneebälle entwickeln, wenn sie beim Durchqueren des inneren Sonnensystems in Sonnennähe aufgeheizt werden und Gase wie Kohlenmonoxid und Methan freisetzen. Das geschieht allerdings erst bei wesentlich höheren Temperaturen, als man erwarten würde, wenn diese äußerst leichtflüchtigen Substanzen als separate Festkörper vorlägen. In diesem Falle würden sie schon bei viel niedrigeren Temperaturen verdampfen – lange, bevor die Kometen das innere Sonnensystem erreicht hätten. Offensichtlich müssen die Gase in der Eisstruktur eingeschlossen sein, die Frage ist nur wie.

Bei der Bildung eines Kometen erwärmt sich das Eis und wandelt sich dadurch vermutlich in die amorphe Form mit niedriger Dichte um. Unseren Tieftemperaturexperimenten zufolge verläuft der Übergang graduell zwischen 35 und 65 Kelvin. Da dabei Wasserstoffbrücken-

Literaturhinweis

Organic Molecules in the Interstellar Medium, Comets and Meteorites: A Voyage from Dark Clouds to Early Earth. Von P. Ehrenfreund und S. Charnley in: Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Bd. 38, S. 427, 2000.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft".*



DOMINIC HART, MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DES NASA AMES RESEARCH CENTER

Flüssiges Helium kühlt ein spezielles Elektronenmikroskop, in dem die Autoren Peter Jenniskens (links) und David F. Blake eine Probe aus amorphem Eis präparieren. Beim Einfüllen in die Apparatur verdunstet das Edelgas teilweise und erzeugt in der feuchten Laborlift wabernde Wolken aus kondensiertem Wasserdampf.

bindungen aufbrechen und sich neu bilden, erhöht sich für die Radikale im Eis die Chance, zu wandern, sich zu begegnen und miteinander zu reagieren. Wenn sich das Eis allerdings so stark erwärmt, dass es kristallisiert, werden alle flüchtigen Fremdmoleküle ausgestoßen und ins All getrieben.

Glaseis wird zu Sirup

Wie hängt die Kristallisation von der Zeit und der Temperatur ab? Unseren Untersuchungen zufolge beginnt sie in einer ersten Stufe bei etwa 135 Kelvin. Dabei ordnen sich die Wassermoleküle in einem kubischen Gitter an (siehe Abbildung auf Seite 31). Organische Moleküle fänden darin keinen Platz. Wir entdeckten aber, dass eine gesonderte amorphe Komponente bestehen bleibt. Nur ungefähr ein Drittel des gesamten Eisvolumens kristallisiert; der Rest behält eine ungeordnete Struktur, die sich kaum von der bei tieferen Temperaturen unterscheidet.

Schon länger war bekannt, dass sich amorphes Eis zwischen 125 und 136 Kelvin in eine viskose Flüssigkeit verwandelt. Dieses Phänomen tritt auch bei anderen amorphen Materialien wie Fensterglas auf und wird als Glasübergang bezeichnet. Unterhalb dieses kritischen Temperaturbereichs ist das Material nicht deformierbar und verhält sich wie ein spröder Festkörper; oberhalb lässt es sich plastisch verformen. Allerdings gleicht die Viskosität der Flüssigkeit knapp oberhalb des Glasübergangs eher der von kaltem Sirup als von gewöhnlichem Wasser. Eine Bewegung, die dort eine Sekunde dauert, würde in der hochviskosen Variante 100000 Jahre benötigen. Aber im Dasein eines Kometen ist das ja keine sonderlich lange Zeit.

Bis zu unserer Entdeckung war kaum jemand auf die Idee gekommen, die viskose Form von amorphem Eis im Weltraum zu vermuten. Es galt als selbstverständlich, dass oberhalb von 135 Kelvin die ungeordnete Tieftemperaturmodifikation rasch im kubischen Gitter kristallisiert. Wir fanden jedoch heraus, dass die viskose Flüssigkeit zwischen 150 und 200 Kelvin beliebig lange mit dem kubischen Eis koexistieren kann. Sie ist daher vielleicht ein wesentlicher Bestandteil der Kometen und auch der eisförmigen Monde unserer Nachbarplaneten, deren Temperaturen alle in diesem Bereich liegen. Das Gemisch aus viskoser Flüssigkeit und kristallinem Eis könnte Fremdmoleküle eingeschlossen und so wichtige organische Verbindungen über lange Zeiten gespeichert haben – bis ein Komet irgendwann vielleicht auf die Erde traf.

Und das führt uns zurück in irdische Sphären. Erwärmt sich das Gemisch aus kubischem Eis und viskoser Flüssigkeit auf etwa 200 Kelvin (immer noch eine ausgesprochen frostige Temperatur von –73 Grad Celsius), wandelt es sich vollständig in die alltägliche hexagonale Form um. Während dieser Rekristallisation werden sämtliche verbliebenen Fremdsubstanzen – einschließlich der organischen Verbindungen – aus dem Festkörper ausgetrieben. Und dann ist das Eis genau so, wie wir es von Schneeflocken, Gletschern oder Martini on the rocks kennen. Aber zum Glück haben die organischen Verbindungen jetzt einen neuen Zufluchtsort gefunden, nämlich das fast überall auf der Erde vorkommende flüssige Wasser.

Wie es scheint, war Wasser also in fester oder flüssiger Form von Anfang bis Ende an der Bildung und Weiterentwicklung von Basismolekülen für das Leben beteiligt. Es erlebte eine lange Reise von seinen Ursprüngen als gefrorene Schicht auf interstellaren Staubpartikeln bis zu seinem letztendlichen Schicksal als flüssiges Wasser auf der Erde – und vielleicht in anderen bewohnbaren Gebieten des Universums.

Die exotischen Formen von Eis mit ihren besonderen physikalischen und chemischen Eigenschaften, die wir gerade erst zu verstehen beginnen, könnten am Ende also mehr über die Geschichte des Universums verraten, als Wissenschaftler dies jemals für möglich gehalten hätten. ■

David F. Blake *leitet am Ames-Forschungszentrum der NASA die Abteilung für Astrobiologie und das Labor für Weltraummikroskopie, das er 1990 gegründet hat. Zu seinen wissenschaftlichen Interessen gehören außer amorphem Eis auch die Suche nach Leben in extraterrestrischem Gestein und die Entwicklung von Weltrauminstrumenten zur Analyse von Mineralien auf anderen Planeten.* ***Peter Jenniskens*** *ist seit 1993 Mitarbeiter von Blake. Er leitete die erste astrobiologische Mission der NASA mit dem Ziel, während der letztjährigen Leoniden-Schauer den Aufprall von Kometenmaterie auf der Erde zu erforschen.*

Das unterschätzte Kleinhirn

Das Kleinhirn koordiniert präzise Bewegungen, hilft beim Hören von Sprache und bei anderen geistigen Leistungen. Mit dem streng geometrischen Schaltplan seiner Nervenzellen erkennt es offenbar kleinste Zeitunterschiede zwischen eintreffenden Signalen.

Von Detlef Heck und Fahad Sultan

Die Entscheidung fällt im Bruchteil von Sekunden. Blitzschnell sprintet der Spieler vor, ergreift den Ball, wirbelt herum – zwei kurze Schritte, er wirft den Ball ins Netz. Zu Recht bewundern wir Spitzensportler und andere Virtuosen, die Bewegungsabläufe meisterhaft beherrschen, ob Rennfahrer oder Artist, Tänzer oder Musiker, Handwerker oder Maschinenschreibkraft. Dass wir alle vergleichbare Präzisionshandlungen jeden Tag viele Male vollführen, ist uns meist weniger bewusst.

In dem Augenblick, in dem ein Basketballspieler den Ball abwirft, muss er die Kontraktion von mehr als sechshundert Muskeln koordinieren: Sein Gehirn wertet blitzschnell die Meldungen der verschiedenen Sinnesorgane aus – auch derer für die Körperhaltung und Muskelanspannung – und stimmt die Muskeltätigkeit damit ab. Dass sein Körper diese enorme Aufgabe so reibungslos leistet, erreicht der Sportler nur durch Training über viele Jahre. Die dabei beanspruchten Teile des Nervensystems spielen sich durch Üben regelrecht aufeinander ein.

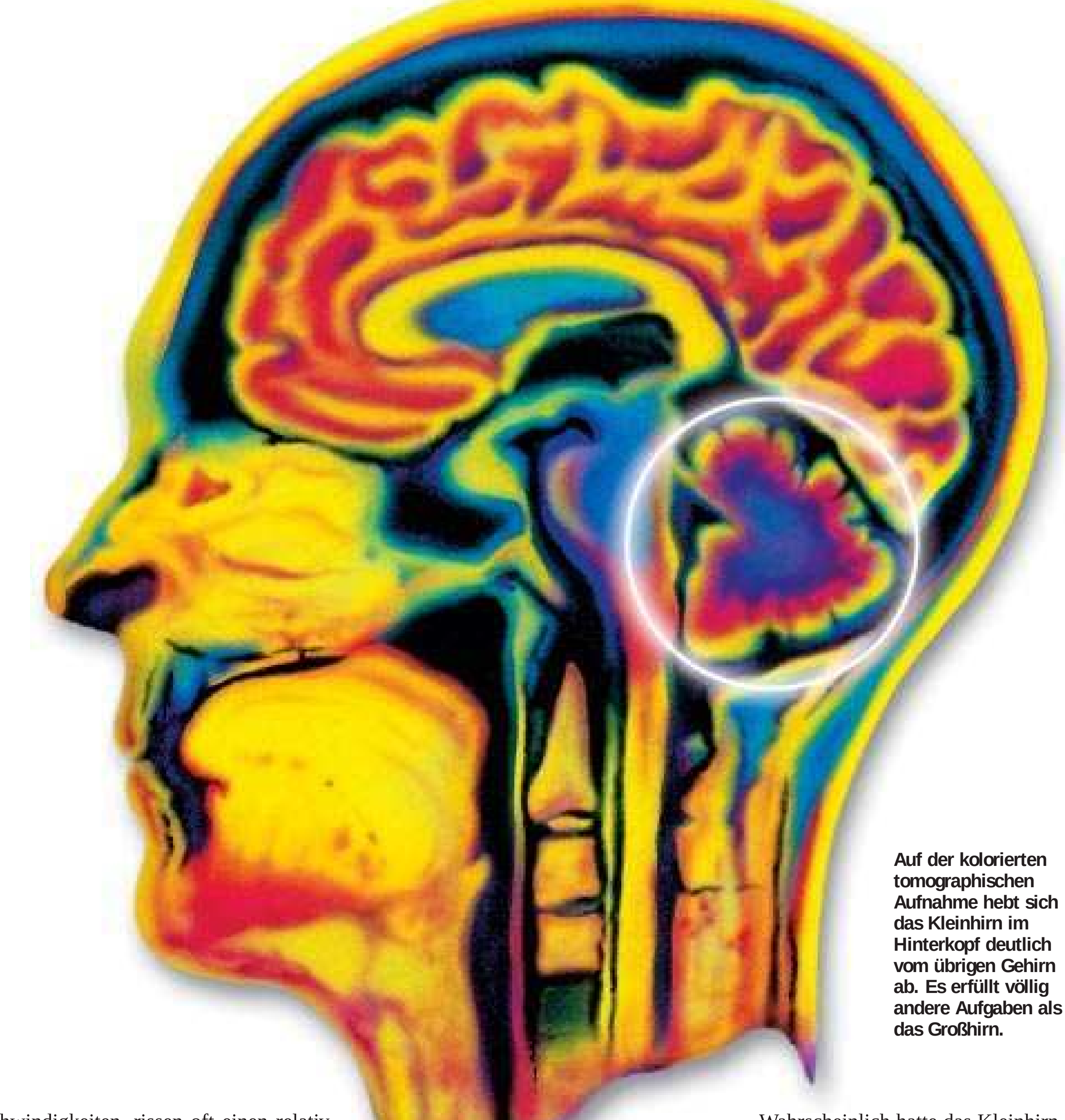
Das Kleinhirn trägt zum Gelingen entscheidend bei. Dass Verletzungen dieses Gehirnteils genaue Bewegungen erheblich erschweren, oft gar unmöglich machen, wissen Mediziner schon lange. In letzter Zeit entdeckten Wissenschaftler noch mehr komplexe Leistungen, an denen das Kleinhirn möglicherweise mitwirkt. Dies scheint bis hin zu einigen geistigen Funktionen wie der Wahrnehmung und Sprachkompetenz zu reichen.

Wie es diese Funktionen erfüllt – und wie weit sich seine Aufgaben tatsächlich erstrecken –, beginnt sich erst jetzt zu zeigen. Gegenüber anderen Gehirnteilen zeichnet sich das Kleinhirn durch einen ungewöhnlich regelmäßigen Aufbau aus. Es besitzt eine Hand voll im Aussehen und ihrer Rolle deutlich unterscheidbarer Nervenzelltypen. Die Verschaltung dieser Neuronen folgt einer strengen Geometrie, die fast an einen elektronischen Schaltkreis erinnert. Hierin vermuten Hirnforscher den Schlüssel zur Arbeitsweise dieser Hirnstruktur und ihrer Funktion im gesamten Gehirn. Wie wir selbst nachwiesen, kann das Kleinhirn aufgrund seines rigiden Aufbaus spezifische, rasch nacheinander eintreffende Signale als Muster erkennen. Dadurch erlaubt es dem Körper, schnelle, streng koordinierte Bewegungsabläufe durchzuführen, und befähigt wahrscheinlich auch zu bestimmten Wahrnehmungsleistungen, etwa bei der Spracherkennung. Diese Versuche bestätigen ein Modell unserer Arbeitsgruppe, nach dem zusammenpassende Signale das Kleinhirn wie eine Flutwelle durchströmen.

Als Erster beschrieb der englische Neurologe Gordon Holmes 1917 die Bedeutung des Kleinhirns für die Steuerung von – insbesondere hochkomplexen – Bewegungen. Im Ersten Weltkrieg untersuchte er Soldaten mit Kleinhirnverletzungen. Die damals neuen Projektile der Handwaffen, verbunden mit höheren Geschossge-



Die Zeichnung der Kleinhirnzellen stammt aus Ramón y Cajals Werk von 1911.



Auf der kolorierten tomographischen Aufnahme hebt sich das Kleinhirn im Hinterkopf deutlich vom übrigen Gehirn ab. Es erfüllt völlig andere Aufgaben als das Großhirn.

schwindigkeiten, rissen oft einen relativ glatten Durchschuss. Viele am Kleinhirn Verletzte überlebten solche Verwundungen. Holmes erkannte, dass diese Männer selbst einfachste Alltagsverrichtungen nicht mehr wie gewohnt auszuführen vermochten. Alles wirkte ungeschickt, vergleichbar vielleicht manchen unbeholfenen Versuchen von Kleinkindern. Auch erschien jede Bewegung abgehackt. Dabei litten die Patienten keineswegs unter Lähmungen und offensichtlich auch nicht unter psychischen Veränderungen.

Typischerweise gelang ihnen die Koordination einfachster Bewegungen nicht mehr. Den Zeigefinger zur Nasenspitze zu führen, war den Versehrten selbst bei geöffneten Augen nicht möglich. Auch eine Kaffeetasse zu ergreifen, fiel ihnen äußerst schwer. Die Hand hielt entweder zu früh oder zu spät an; oft stieß sie die Tasse um. Solche Koordinationsausfälle bezeichnen Ärzte als „Ataxie“. Manche der Verletzten litten auch unter unkontrollierbaren Schüttelbewegungen der Glieder, die immer dann einsetzten, wenn sie eine gezielte Bewegung ausführen wollten, zum Beispiel nach etwas zu greifen versuchten. Der „Intentionstremor“ wurde tückischerweise umso stärker, je näher die Hand dem Ziel kam. Bei manchen Betroffenen schwang sie so stark hin und her, dass diese den Gegenstand nicht zu fassen bekamen.

Wahrscheinlich hatte das Kleinhirn – fachsprachlich „Cerebellum“ (lateinisch für „kleines Hirn“) – in der Evolutionsgeschichte zunächst andere Funktionen. Es stellt einen sehr alten Hirnteil dar. Offenbar war es bereits bei den frühen Wirbeltieren vorhanden. So weist das noch sehr urtümliche, aalförmige Neunauge ein primitives Kleinhirn auf, dass nur als kleine Aufwölbung des Gehirns erscheint. Schon an dieser Struktur fallen parallel verlaufende Fasern auf, die beide Gehirnseiten verbinden und für unser Kleinhirn so charakteristisch sind. Doch handelt es sich beim Neunauge erst um ein kurzes, schmales Band. Mit welchen Aufgaben das Kleinhirn ursprünglich betraut war, wissen wir nicht sicher. Seine innige Verbindung zu den Gleichgewichtszentren im Hirnstamm spricht da- ▶

für, dass es sich mit dem Gleichgewicht befasste. Doch könnte es auch Wasserbewegungen und Druckveränderungen verrechnet haben, die Fische durch ein spezielles Sinnesorgan an den Körperseiten wahrnehmen. Später hat die Evolution Kleinhirne in erstaunlich vielfältiger Form und Größe hervorgebracht. Auffallenderweise bleibt aber bis auf wenige Ausnahmen die strikte innere „Verschaltung" – das Ordnungsmuster der Nervenzellen und Verknüpfungen – gleich.

Die Eigenart des Kleinhirns fällt besonders gegenüber dem Großhirn auf. Interessanterweise wurden die beiden Gehirnteile in der Evolution parallel größer. Auch während der individuellen Entwicklung reifen die beiden Hirnrinden gleichzeitig. Wie innig Groß- und Kleinhirn verbunden sind, zeigt sich darin, dass zwischen beiden Strukturen Millionen von Nervenfasern verlaufen (Bild S. 42 oben). Den Großteil seiner Signale erhält das Kleinhirn aus dem Großhirn über eines der dicksten Faserbündel im Hirnstamm. Umgekehrt schickt es viele seiner eigenen Signale zum Großhirn.

Mehr Nervenzellen als das Großhirn

Die beiden Strukturen könnten verschiedener kaum sein. So verlaufen die Falten und Furchen der Großhirnrinde kreuz und quer in etliche Richtungen. Die Kleinhirnrinde aber ist durchgehend in derselben Richtung gefaltet, quer zur Längsachse des Körpers. Die Großhirnrinde kann mehrere Millimeter dick werden, die Rinde des Kleinhirns misst nur einige zehntel Millimeter Dicke.

In dieser Rindenschicht, der „grauen Substanz", liegen in beiden Fällen die Nervenzellen. Auch befinden sich hier die zahlreichen „Synapsen", die Kontaktstellen, an denen die Nervenzellen über verästelte Ausläufer voneinander Signale empfangen. Unter der Rinde liegt die „weiße Substanz" aus den langen Zellfortsätzen – „den Axonen" –, mit denen Neuronen Signale zu entfernteren Orten versenden. Diese Fortsätze sind zwecks schnellerer Weiterleitung der elektrischen Signale von speziellen Zellen umhüllt und wirken deswegen in Präparaten hell. Im Großhirn nehmen solche langen weiterleitenden Fasern ein enormes Volumen ein. Größtenteils verbinden sie verschiedene Regionen des Großhirns untereinander. Das Kleinhirn hingegen weist deutlich weniger weiße Substanz auf. Seine langen fortleitenden Fasern schicken die Signale außerdem ausschließlich zu anderen Hirnteilen, hauptsächlich zum Großhirn.

Ansonsten ist das Kleinhirn aber nur an Volumen – mit einem Sechstel – deutlich kleiner als das Großhirn. Denn seine Fläche entspricht ausgebreitet ungefähr der einer entfalteten Hemisphäre der Großhirnrinde. Eine Großhirnhemisphäre wirkt auseinander gezogen etwa wie ein unregelmäßig zerfranster, in allen Richtungen mehr oder weniger gleich breiter Lappen von etwa dreißig Zentimeter Durchmesser. Dagegen ergibt das Kleinhirn ein fast zweieinhalb Meter langes, schmales Band (Bild oben).

Erstaunlicherweise enthält das Kleinhirn fünfmal so viel Nervenzellen wie das Großhirn: ungefähr hundert Milliarden gegenüber zwanzig Milliarden im Großhirn. Nimmt man die Neuronenzahl und die Größe der Oberfläche als ein grobes Maß für die Informationsverarbeitungskapazität, dann darf man vermuten, dass das Kleinhirn zwar andere, aber ähnlich komplexe Aufgaben zu erfüllen hat wie das Großhirn – was neuere Untersuchungen auch bestätigen.



Der Blick auf unser Gehirn von hinten zeigt die enge Faltung des Kleinhirns. Entfaltet ergibt es ein über zwei Meter langes Band.

DETLEF HECK/ FAHAD SULTAN

Vor rund hundert Jahren hatte der spanische Anatom Santiago Ramón y Cajal (1852–1934) erstmals die einzelnen Zelltypen des Kleinhirns und die auffallende Schichtung von Nervenzellen und Fasern in der Kleinhirnrinde genau beschrieben. Er hatte eine damals neue Anfärbungsmethode so verfeinert, dass er komplette Gehirnzellen mit ihren Fortsätzen in vorher nie gesehener Detailtreue einzeln darstellen konnte. Die Zelltypen, die er im Kleinhirn beschrieb, gelten heute noch, ebenso ihre Namen (Kasten rechts).

Ramón y Cajal erkannte, dass die Kleinhirnrinde aus drei optisch unterscheidbaren Schichten besteht. Die innere und die mittlere stecken dicht voller Zellkörper, die äußere besteht hauptsächlich aus Zellfortsätzen, gespickt voller Synapsen zur Signalübertragung. In dieser äußeren „molekularen Schicht" (so genannt wegen der scheinbar homogenen Struktur bei klassischen histologischen Färbungen) spielt sich denn auch das Hauptgeschehen ab. Wie ein regelmäßiges dreidimensionales Webmuster flechten die Zellausläufer sich hier ineinander.

Strenge Arbeitsteilung der Zellen

Jede dieser drei Schichten weist besondere, in Größe, Form und Art der Kontakte charakteristische Zelltypen auf. Jeder Typ übernimmt mithin im Gesamtverband eine ganz bestimmte Aufgabe. Am größten und eindrucksvollsten wirken die „Purkinjezellen" (benannt nach dem böhmischen Physiologen Johannes E. Purkinje, 1787–1869). Deren große Zellkörper ordnen sich exakt in Reih und Glied im Abstand von fünfzig Mikrometern (fünf hundertstel Millimetern) in der mittleren, nach ihnen bezeichneten Schicht an. Als einzige Neuronen der Kleinhirnrinde senden die Purkinjezellen über ihre weiterleitenden Fortsätze Signale aus der Rinde fort ins Innere des

Steckbrief

Das Problem

Die Nervenzellen in der Kleinhirnrinde sitzen akkurat in Reih und Glied. Auch ihre Ausläufer stehen senkrecht zueinander. Wie steuert das Kleinhirn mit Hilfe dieses strengen Verflechtungsmusters Bewegungen?

Die These

In der Kleinhirnrinde eintreffende Signale müssen eine gemeinsame Erregungswelle, eine „Flutwelle", erzeugen. Nur dann sendet das Kleinhirn eine Meldung an das Großhirn.

Die vermutete Lösung

Dank der geometrischen Trennung von erregenden und hemmenden Zellkontakten besteht die Kleinhirnrinde aus vielen Tausenden von „Zeilen". In den einzelnen Abschnitten jeder Zeile steckt sozusagen die Koordination für jeweils ganz bestimmte Bewegungen, passend zur Situation. Nur Signale für sauber koordinierte Bewegungen werden ans Großhirn weitergeschickt.

Die Zellen in der Kleinhirnrinde

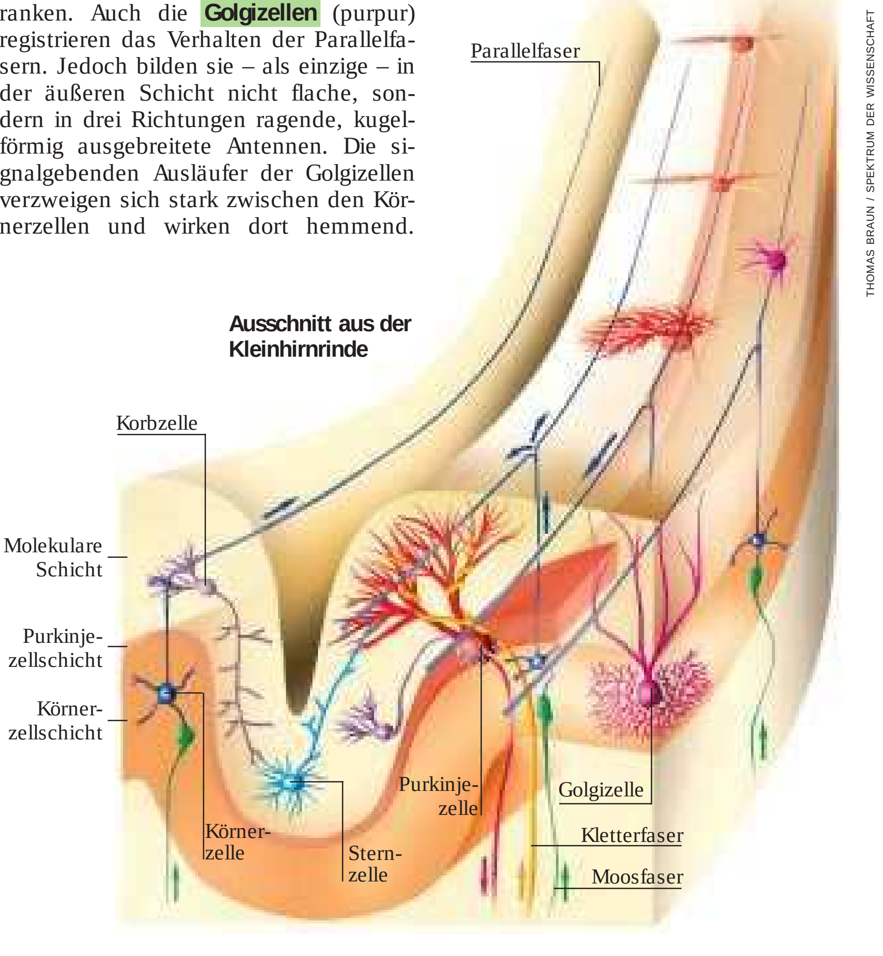
Charakteristische Zelltypen mit spezifischen Aufgaben

Das strenge, rechtwinkelige Verschaltungsmuster der Nervenzellen in der Kleinhirnrinde bildet den Hintergrund für die Steuerung präziser Bewegungen.

Folgende Nervenzelltypen liegen dort: Die **Körnerzellen** (blau) bilden die „Eingangsstation“ für eintreffende Signale. Sie liegen in der tiefsten Rindenschicht (braun) und sind, mit 2,7 Millionen pro Kubikmillimeter, die häufigsten Nervenzellen des Gehirns. Die Eingangssignale erhalten sie über die **Moosfasern** (grün), deren Zellkörper im Hirnstamm sitzen.

Die Körnerzellen selbst verschicken ihre Nachricht über die charakteristischen **Parallelfasern** (blau). Von jeder Zelle steigt ein Ausläufer in die äußere Rindenschicht (beige) auf, wo er sich in zwei rechtwinklig abbiegende, mehrere Millimeter lange Arme gabelt. Diese Fasern ziehen dicht bei dicht durch die flach aufgefächerten Empfangsantennen der quer zu ihrer Laufrichtung stehenden großen **Purkinjezellen** (rot), welche die „Ausgangsstation“ der Kleinhirnrinde bilden. Die schicken ihre Meldungen, nach Umschaltung in Zwischenstationen, vor allem ans Großhirn. Über die Parallelfasern erhalten sie Signale, die ihre Aktivität steigern. Dagegen knüpfen die **Stern-** (hellblau) und die **Korbzellen** (lila), Varianten des gleichen Zelltyps, zu den Purkinjezellen Kontakte, über die sie deren Aktivität dämpfen. Auch ihre Empfangsantennen stehen quer zu den Parallelfasern, deren Erregungen sie registrieren. Sie regeln somit, welche von den Meldungen brauchbar sind, die auf den „Straßen“ oder „Zeilen“ der Parallelfasern bei den Purkinjezellen eintreffen.

Zur Kontrolle der Purkinjezellen, und wohl zum Lernen, dienen auch die **Kletterfasern** (gelb), die aus dem Hirnstamm in die Kleinhirnrinde ziehen und die Empfangsfächer der Purkinjezellen umranken. Auch die **Golgizellen** (purpur) registrieren das Verhalten der Parallelfasern. Jedoch bilden sie – als einzige – in der äußeren Schicht nicht flache, sondern in drei Richtungen ragende, kugelförmig ausgebreitete Antennen. Die signalgebenden Ausläufer der Golgizellen verzweigen sich stark zwischen den Körnerzellen und wirken dort hemmend. Vermutlich sorgen sie dafür, dass die allgemeine Aktivität in der äußeren Rindenschicht nicht zu hoch wird.



Kleinhirns. Von dort werden diese Informationen unter anderem zum Großhirn weitergeleitet, insbesondere zur motorischen Rinde, von wo das Gehirn schließlich die Bewegungsbefehle gibt. Somit stellen die Purkinjezellen die einzigen „Ausgangsneuronen“ dar, die an andere Gehirnteile Verrechnungsergebnisse der Kleinhirnrinde verschicken.

Für den Signalempfang besitzt jede Purkinjezelle einen großen, flachen „Dendritenbaum“ oder besser „Dendritenfächer“. Mit zahlreichen Synapsen stehen diese Fächer in der äußersten Schicht der Kleinhirnrinde dicht gepackt neben- und hintereinander, aber alle in derselben Ausrichtung quer zu den Falten der Rinde. Jeder Fächer überspannt etwa ein zehntel Quadratmillimeter, ist aber nur ein hundertstel Millimeter dick. Er weist hundert- bis zweihunderttausend synaptische Kontakte für eingehende Signale auf, eine selbst für Gehirnneuronen außergewöhnlich hohe Anzahl. Das sind bis zu zwanzigmal mehr Synapsen als auf einem typischen Neuron der Großhirnrinde. Folglich erhält eine Purkinjezelle auch aus zwanzigmal mehr Quellen Nachrichten wie Nervenzellen des Großhirncortex.

Die Purkinjezellen erhalten ihre Signale großenteils von den zahlreichen „Körnerzellen“ aus der inneren der drei Schichten. Die „Körnerzellschicht“ steckt dicht voller dieser kleinen Zellen, die einen weiterleitenden Fortsatz in die äußere Schicht schicken, wo dieser sich wie ein „T“ gabelt. Die beiden Schenkel ziehen parallel zu den Furchen des Kleinhirns dicht an dicht je zwei bis drei Millimeter weit und durchqueren dabei die Fächer von mehreren hundert Purkinjezellen. Diese Querfasern – „Parallelfasern“ genannt – bilden eine der markantesten Strukturen des Kleinhirns. Sie liegen so dicht, dass im Querschnitt auf einen Quadratmillimeter sechs Millionen Fasern kommen. Ihre streng parallele Ausrichtung dürfte der Grund dafür sein, dass die Falten des Kleinhirns alle in derselben Richtung verlaufen – in der Richtung der Parallelfasern.

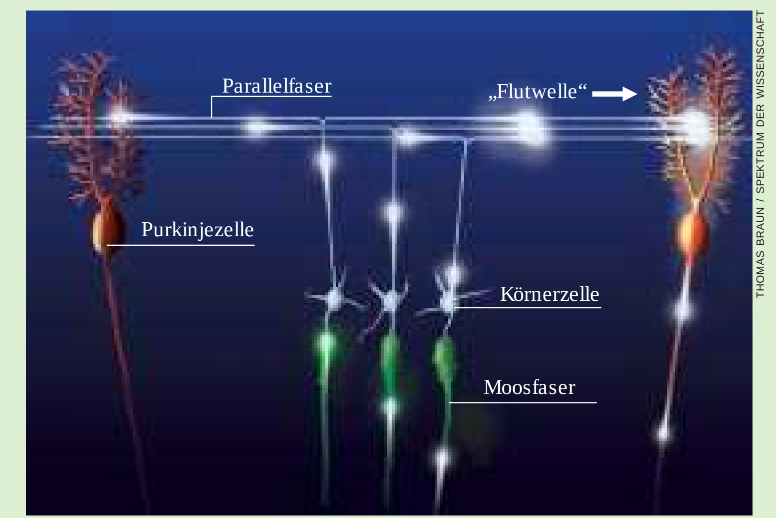
Das Verschaltungsprinzip zwischen Körner- und Purkinjezellen ist sehr klar: ▶

Funktionsmodell eines Sequenzdetektors

„Flutwellen“ – Gewähr für glatte Bewegungen

Wie sorgen die Zellen des Kleinhirns für präzise abgestimmte schnelle Bewegungsabläufe?
In der Kleinhirnrinde sind allein die Purkinjezellen (rot) befugt, Meldungen ans Großhirn zu verschicken. Sie dürfen sich aber nur „anfeuern“ lassen, wenn eine Bewegung in der momentanen Situation Erfolg verspricht. Dann werden ihre großen Antennenfächer von durchziehenden Parallelfasern mit einem Schub erregender Signale überflutet.
Diesen Erregungsschub liefern jeweils Körnerzellen (blau) in ihrer Nachbarschaft. Damit die Signale synchron als „Flutwelle“ über die Parallelfasern laufen und gleichzeitig bei einer Purkinjezelle eintreffen, müssen die verschiedenen Körnerzellen von außerhalb zeitlich versetzt angeregt werden: die entfernteren Zellen zuerst, die nächsten Zellen am spätesten.

Wir vermuten, dass das Kleinhirn lernt, nur ganz bestimmte Kombinationen von Signalen zuzulassen. Es erkennt spezifische bewährte Signalsequenzen, die sich aus sehr vielen Informationen zusammensetzen. Darin stecken Meldungen der Sinnesorgane über die Haltung des Körpers und seine Situation in der augenblicklichen Umwelt sowie über Bewegungsvorhaben des Großhirns.
Wahrscheinlich „codiert“ die Kleinhirnrinde auf ihrer Oberfläche verteilt die unzähligen Möglichkeiten, in denen wir Bewegungen ausführen.



Eine „Flutwelle“ trifft die rechte Purkinjezelle.

Körnerzellen empfangen Signale von außerhalb des Kleinhirns und können dann ihrerseits Purkinjezellen in einem Zusammenspiel vieler erregender Synapsenkontakte zu mehr Aktivität antreiben. Diese senden, wenn sie stark genug erregt werden, Signale aus dem Kleinhirncortex fort.

Doch das Endergebnis bestimmen noch andere Zellen mit. So sitzen in der äußeren Schicht weitere, unauffälligere Zellen, die dort auch – allerdings eher lockere – Fächer ausbilden. Diese Dendritenbäume stehen ebenfalls quer zu den Furchen und damit senkrecht zur Richtung der Parallelfasern. Auch diese Neuronen bilden mit ihren fortleitenden Axonen Synapsen zu den Purkinjezellen. Nur versenden sie hemmende Signale, vermindern also die Gesamtaktivität des Empfängers. Das bedeutet vereinfacht gesagt, eine Purkinjezelle muss aus der Vielzahl teils sie erregender, teils sie hemmender chemischer Botschaften ein Gesamtergebnis ermitteln.

Hemmende Signale empfangen – über wieder andere „Aufpasser“ – aber auch die Körnerzellen. Das verhindert vermutlich, dass die allgemeine Aktivität in der äußeren Schicht zu stark steigt. Diese hemmenden Neuronen (Golgi-Zellen genannt) sind übrigens die einzigen in der Kleinhirnrinde, die aus dem strengen Schema ausbrechen, sich mit ihren Verästelungen nur in zwei Raumrichtungen auszudehnen.

Ganz wichtig sind bei der Verarbeitung auch die „Kletterfasern“, die aus dem Stammhirn aufsteigen und die Fächer der Purkinjezellen eng umranken. Auffälligerweise treten sie nur gewissermaßen als Sonderkommando in Aktion, falls nämlich eine Purkinjezelle sozusagen unpassend aktiv wird. Die Kletterfasern wirken wie Lehrer, die ihre Schüler zurechtweisen. Sie scheinen tatsächlich dann einzugreifen, wenn das Kleinhirn einen Bewegungsablauf erst lernt.

Lokal begrenzte Erregungsmuster

Das wesentliche Prinzip der Zellordnung in der Kleinhirnrinde ist offensichtlich. In der äußeren Schicht, wo zahlreiche Neuronen Kontakte zueinander aufnehmen, gibt es für die Ausläufer hauptsächlich zwei Richtungen: parallel zu den Falten oder in einer dazu senkrecht stehenden Ebene. Ganz wichtig: Die in der Parallelrichtung laufenden Axone, also die Parallelfasern, erzeugen erregende Signale, die anderen hemmende. Was nun hat diese penible, fast eintönige Ordnung mit den Aufgaben des Kleinhirns zu tun? Und welchen Sinn macht dabei die akkurate Ausrichtung der erregenden und hemmenden Elemente?

Völlig im Gegensatz zum Kleinhirn findet man in der Großhirnrinde mit wenigen Ausnahmen weder eine bevorzugte Richtung der Fasern noch eine geometrische Trennung von erregenden und hemmenden Nervenfasern. Ein wesentliches Merkmal dieses Netzwerks sind ja gerade Rückkopplungsschleifen über wie zufällig verschaltete Gruppen von Neuronen, die sich gegenseitig erregen und so hochschaukeln. Das Großhirn kann sich selbst erregen. Es muss nicht von außen angestoßen werden.

Ein Hochschaukeln kommt in der Kleinhirnrinde nicht vor: Denn von ihren Neuronen erzeugen allein die Körnerzellen durch ihre Synapsen auf den Parallelfasern Erregungen. Alle anderen Zelltypen aber liefern hemmende Signale. Da das Kleinhirn deswegen eine Erregung weder selbstständig generieren noch erhalten kann, ist es völlig auf andere Hirnteile angewiesen, um aktiviert zu werden. Es kann also nur auf Fremdsignale reagieren.

Eine Besonderheit stellt auch dar, dass das Kleinhirn jede eintreffende Information in einem sehr begrenzten Umfeld bearbeitet. Da die längsten Fasern

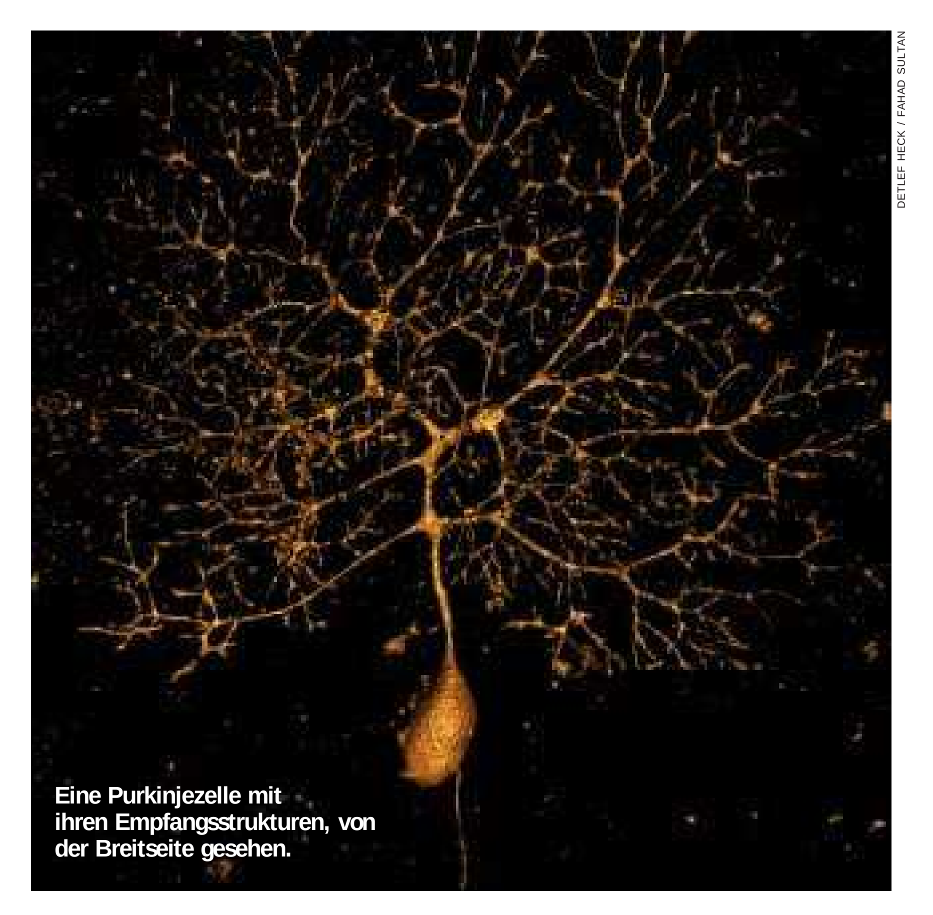
der Kleinhirnrinde, die Parallelfasern, mit wenigen Millimetern sehr kurz sind, bleiben die Nachrichten, völlig anders als im Großhirn, praktisch an Ort und Stelle. Konkret: Jede Purkinjezelle unterliegt nur dem Einfluss der Körnerzellen wenige Millimeter in ihrem Umfeld. Im Großhirn erfolgt der meiste Informationsaustausch viel großräumiger und sogar zwischen den beiden Hirnhälften.

Perfektion durch Flutwellen

Genau diese räumliche Beschränkung ermöglicht es dem Kleinhirn, so unsere These, seine besonderen Aufgaben zu erfüllen. Valentin Braitenberg, ehemals Direktor am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen, entwarf hierzu bereits 1958 ein Funktionsmodell, das wir in den letzten Jahren experimentell bestätigen konnten. Er nannte es „Flutwellentheorie des Kleinhirns“. Viele der hier dargestellten neuen Ergebnisse haben wir während unserer Zeit als Mitarbeiter in seinem Institut gewonnen.

Braitenbergs Idee zufolge läuft bei einem glatten, eingeübten Bewegungsablauf auf dem jeweils beanspruchten kleinen Fleck der Kleinhirnrinde über viele benachbarte Parallelfasern eine Welle aus Signalen, die dadurch geballt auf die dortigen Purkinjezellen treffen. Die Signalwelle überschwemmt diese Ausgangsstation im Kleinhirn regelrecht, die dann das übrige Gehirn informiert. Das heißt: Nur, wenn alle eintreffenden Signale so zusammenpassen, dass eine Flutwelle entsteht, liefern die Purkinjezellen die richtigen Meldungen. Nach dieser Vorstellung müssen die von außen eintreffenden Signale bei – anschaulich gesagt – zwei und mehr hintereinander liegenden Körnerzellen genau um so viel zeitlich versetzt einlaufen, dass die Erregungen über ihre Axone (die Parallelfasern) anschließend auf gleicher Höhe laufen. Zwei benachbarte Körnerzellen müssen für eine reibungslose Bewegung also mit exakt so viel zeitlicher Verzögerung stimuliert werden, wie ein Signal entlang einer Parallelfaser benötigt, um die Strecke dazwischen zurückzulegen. Von Vorteil dürfte hierbei sein, dass die Parallelfasern Signale besonders langsam leiten. Nur wenn viele Körnerzellen unter diesen Bedingungen eingespannt werden, entsteht eine Signalflutwelle.

Wozu könnten die Flutwellen nützen? Die motorischen Zentren in der Großhirnrinde, die übergeordnet die Muskulatur koordinieren, können nur relativ langsam in gerade ablaufende Bewegungen eingreifen. Sie brauchen fortlaufend, für jeden Einzelschritt, die Rückmeldung aus dem Körper und von den Sinnesorganen, und das benötigt Zeit. Blitzschnelle, glatte, automatische Bewegungen vermag die Großhirnrinde allein nicht schnell genug zu steuern. Dafür benötigt sie offensichtlich die Hilfe des Kleinhirns. Dieses erkennt, so Braitenbergs Idee, jeweils spezifische Komplexe aus vielen Signalen, die über die Körnerzellen innerhalb weniger Millisekunden zusammen bei ihm eintreffen. Nur wenn die Signale zeitlich in bestimmter Weise zusammenpassen, kann eine Flutwelle entstehen. Diese Signale stammen von Sinnesorganen aus dem ganzen Körper – also unter anderem aus dem Bewegungsapparat, von den Augen und Ohren und dem Gleichgewichtssystem – und auch vom Großhirn. Die Flutwellen sind sozusagen ein Ausdruck dessen, dass ein beim Kleinhirn eintreffendes Sequenzmuster „passt“. Das Kleinhirn stellt regelrecht einen „Sequenzdetektor“ für die Zeitmuster in solchen Signalkomplexen dar.


DETLEF HECK / FAHAD SULTAN

Eine Purkinjezelle mit ihren Empfangsstrukturen, von der Breitseite gesehen.

Purkinjezellen – die Signale zu den motorischen Zentren im Großhirn schicken – würden besonders stark aktiviert, wenn möglichst viele Parallelfasern sie gleichzeitig „anspornen“. Genau das würde durch eine Flutwelle geschehen. Denn mit ihren quer zu den Parallelfasern aufgespannten Dendritenfächern könnten die Purkinjezellen eine durchrasende Welle in einem winzigen Sekundenbruchteil erfassen. Gleiches gilt für die genauso aufgespannten Dendritenfächer der anderen Zelltypen, die bei der Verarbeitung der Information helfen.

Die Theorie der Flutwellen basierte zwar auf den bekannten anatomischen Gegebenheiten. Doch wusste niemand, ob in der Kleinhirnrinde wirklich solche Flutwellen auftreten können – ob also der postulierte Sequenzdetektor überhaupt funktionieren würde.

Wir haben dies an Rattengewebe geprüft. Bei in Nährlösung gehaltenen Präparaten von Kleinhirnrinde versuchten wir kleine künstliche Flutwellen über elektrische Reizelektroden zu erzeugen. Dazu bastelten wir einen „Kamm“ mit „Zinken“ (feinen Spitzen) aus Metalldraht. Über die Zinken schickten wir kurze, schwache Stromstöße zu hintereinander liegenden Körnerzellen, als würden sie jeweils von neuronalen Signalen verschiedener Herkunft erregt.

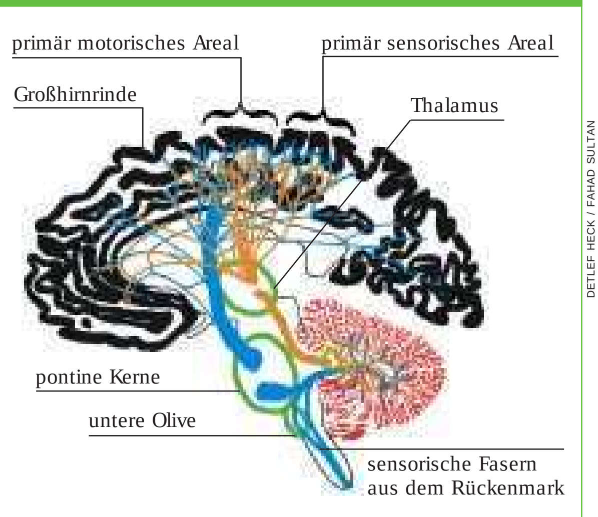
Das zeitliche Muster der nebeneinander gesetzten Stromstöße variierten wir, die Anzahl blieb jedoch gleich. Mal ließen wir die Stromstöße schneller, mal langsamer den Kamm entlang laufen. Auch konnten wir die Richtung umkeh- ▶

ren, oder wir erzeugten eine Zufallsverteilung des Reizmusters.

Das Experiment brachte tatsächlich das in der Flutwellentheorie vorhergesagte Ergebnis. Die einzelnen Körnerzellen mussten so schnell hintereinander stimuliert werden, wie die Parallelfasern Signale weiterschicken. Dann liefen die Erregungen synchron über die Parallelfasern. Die Gesamtaktivität in einem Abschnitt zu einer bestimmten Zeit wurde schwächer, wenn die Reize einander schneller beziehungsweise langsamer als das Idealtempo folgten. Und sie blieb gering, wenn die Reize am Kamm in beliebiger Reihenfolge gesetzt wurden. Die Purkinjezellen wiederum erzeugten die besten Signale, wenn die Parallelfasern an ihrem Empfangsfächer synchron aktiv waren. Dies konnten wir später auch an narkotisierten Tieren bestätigen.

Kontakte zum Großhirn

Das Kleinhirn (rot) hat zu vielen Bereichen des Großhirns (schwarz) Verbindung. Die meiste Information erhält es aus den Arealen, in denen das Großhirn Bewegungen veranlasst und Nachrichten von den Sinnesorganen empfängt (blaue Verbindungen). Hierhin schickt es auch hauptsächlich seine Verrechnungsergebnisse (gelbe Verbindungen). Doch das Kleinhirn konferiert offensichtlich ebenso mit Vorderhirnbereichen und anderen assoziativen Gebieten des Großhirns, wie dies auch neuere Verhaltensversuche enthüllen.

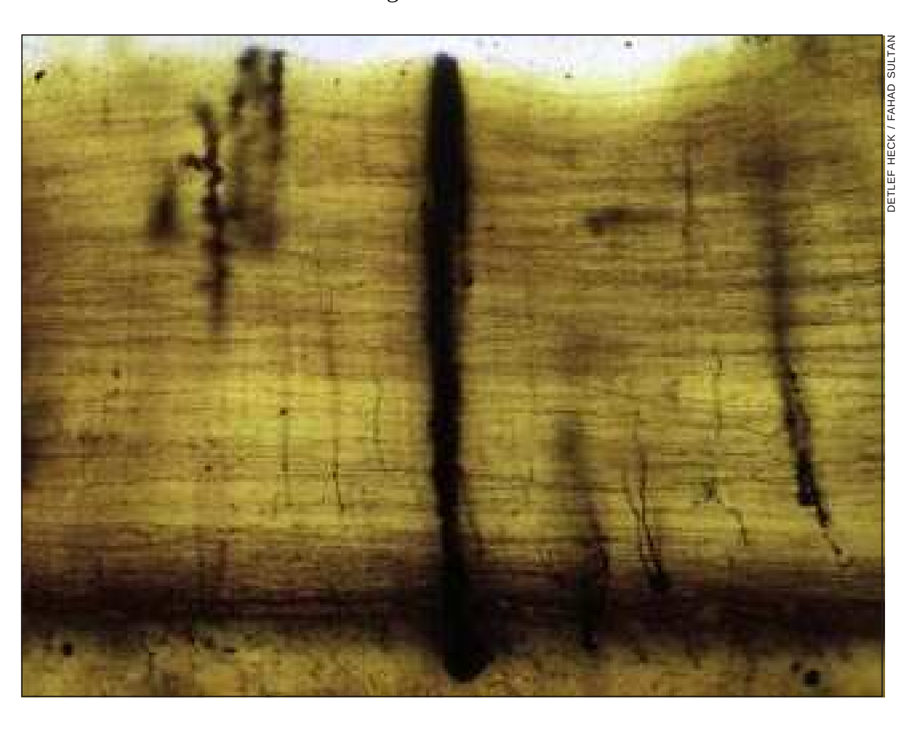


DETLEF HECK / FAHAD SULTAN

Ob Baseballer oder Trapezkünstler, Pianisten oder Rennfahrer: Sie alle sind sozusagen Profis für Flutwellen. Doch im Grunde sind wir das normalerweise alle. Unser Kleinhirn ist ein Künstler darin, verschiedenste komplexe Bewegungsabläufe glatt abspulen zu lassen. Dazu gehören selbst viele nur scheinbar einfache Handbewegungen. Schon um einen Kugelschreiber zu ergreifen, müssen viele Muskeln in Hand und Arm genauestens nach einem flexiblen, an die Situation anpassungsfähigen Zeitplan zusammenarbeiten. Damit das möglich ist, integriert das Kleinhirn Signale von verschiedenen Sinnen, in dem Fall Informationen von den Augen, über die Körperhaltung und Stellung der Gliedmaßen, Haltung von Hand und Fingern und über die Muskeltätigkeit, und führt sie mit Impulsen vom Großhirn zusammen. Das Ergebnis teilt es dann kontinuierlich der Großhirnrinde mit, die nun den Bewegungsablauf entsprechend anpasst. Wie das Großhirn diese Informationen abfragt und in seine Entscheidungen integriert, wissen wir allerdings noch nicht im Einzelnen.

Ein Baseballspieler beispielsweise muss für einen scharfen, gezielten Weitwurf die Finger mit einer zeitlichen Präzision von einer tausendstel Sekunde öffnen, sonst wirft er zu hoch oder zu tief. Wie kooperieren Groß- und Kleinhirn dabei? Das Kleinhirn empfängt aus der Großhirnrinde das Kommando zum Werfen. Daran muss es, abgestimmt mit der Körperhaltung und der Orientierung zum Ziel, die Muskelkontraktionen anpassen. Jede der vielen möglichen Situationen, zum Beispiel ob der Spieler gerade läuft oder aus dem Stand heraus wirft, verlangt einen anderen Bewegungsablauf – oder genauer gesagt eine andere Abfolge von Muskelkontraktionen. Jede Kombination von Zielvorgaben aus der Großhirnrinde und Signalen zur Körperhaltung des Werfers trifft irgendwo im Kleinhirn so zusammen, dass eine Flutwelle entsteht. Jede Kombination, so die Vermutung, ist also an einem eigenen Ort repräsentiert.

Die Koordination von Bewegungen muss teilweise durch jahrelanges Üben erlernt werden, angefangen mit einfachsten Abläufen wie dem Gehen bei Kleinkindern. Dabei stellen wir uns vor, dass die erregenden Eingänge zu den Körnerzellen des Kleinhirns während der Kindesentwicklung ständig an unterschiedlichen Orten neu entstehen oder wieder abgebaut werden. Eingänge, die zu erfolgreichen Bewegungen beigetragen haben, bleiben bestehen, die übrigen verschwinden wieder. Beim Erwachsenen können sich wahrscheinlich keine neuen Eingänge mehr bilden. Daher wird hier ein zweiter Lernmechanismus wichtig. Wahrscheinlich lernt ein Erwachsener



DETLEF HECK / FAHAD SULTAN

Zahlreiche Parallelfasern (feine horizontale Linien) durchziehen die Purkinjezelle, die hier in der Mitte mit ihrer Schmalseite sichtbar ist.

neue komplexe Bewegungsabläufe dadurch, dass die Kletterfasern solche Purkinjezellen sozusagen abschalten, die auf „ungeeignete“ Flutwellen reagiert haben: Deren erregende Eingänge werden derart abgeschwächt, dass bei einem erneuten Auftreten der gleichen Flutwelle die Zelle nicht mehr antwortet. Andere Purkinjezellen, deren Aktivität zum Erfolg der Bewegung beigetragen hat, werden hingegen verstärkt. Auf diese Weise werden die zahlreichen, während der Kindesentwicklung etablierten Flutwellen den veränderten Bewegungsansprüchen des Erwachsenen angepasst.

Mitsprache bei geistigen Prozessen

Die sonderbar gestreckte Form des entrollten Kleinhirns wird nun verständlich. Sein Cortex besteht nach unserer Vorstellung gewissermaßen aus einzelnen Zeilen aus jeweils vielen Parallelfasern. Im entfalteten Kleinhirn verlaufen diese Zeilen quer – auf den Körper bezogen also von rechts nach links und umgekehrt. Jede Zeile erfasst den Einzugsbereich derjenigen Purkinjezellen, die auf dieser Höhe nebeneinander stehen. Nimmt man den Abstand zwischen zwei Purkinjezellen in der Längsrichtung als Zeilenhöhe, dann besitzt das Kleinhirn fast fünfzigtausend Zeilen. Die Zahl möglicher spezifischer Flutwellen mag sogar weitaus größer sein, wenn pro Zeile viele Signalkombinationen verarbeitet werden. Demnach sind im Kleinhirn sicherlich um ein Vielfaches mehr Bewegungsabläufe repräsentiert, als es Zeilen aufweist.

Die Zeilenstruktur erklärt, wieso die Fortsätze der hemmenden Neuronen in der Kleinhirnrinde quer zu den Parallelfasern verlaufen, also in der Längsrichtung des entfalteten Kleinhirns. Dank dieser Anordnung unterdrückt die jeweils am stärksten erregte Zeile die Aktivität in ihren Nachbarzeilen. So ist dafür gesorgt, dass nur die offenbar am besten zusammenstimmende Kombination von im Kleinhirn eintreffenden Signalen in der Großhirnrinde einen Effekt erzielt. Ähnliche, nicht ganz so gute Kombinationen würden den klaren Bewegungsablauf nur stören und werden unterbunden. Dieses Prinzip, Nachbarn zu hemmen, um eine gesonderte Information besonders deutlich herauszustellen, tritt im Nervensystem öfter auf. Zum Beispiel gelingt es so den Zellen in der Netzhaut, Konturen zu verschärfen.

Mit diesem Bild vor Augen lässt sich vorstellen, wieso Kleinhirnläsionen die präzise Steuerung von schnellen Bewegungsabläufen unmöglich machen. Rasche Willkürbewegungen enthalten immer auch „automatische“ Komponenten. Kleinhirnläsionen verringern die zeitliche Präzision der Muskelkontraktionen. Dies könnte auch erklären, wieso viele der Patienten Gleichgewichtsprobleme haben und so leicht hinfallen. Um den Körper aufrecht zu halten, muss vermutlich die Aktivität der einzelnen Muskelpartien ständig korrigierend zeitlich genau aufeinander abgestimmt werden.

Erst spät erkannten die Forscher, dass das Kleinhirn neben der Bewegungssteuerung noch mehr Aufgaben besitzt. Die modernen tomographischen Verfahren, die das unversehrte Gehirn gewissermaßen in Aktion zeigen, ermöglichten vor gut einem Jahrzehnt zum ersten Mal, auch das tätige menschliche Kleinhirn zu beobachten. Im Jahre 1989 wendete die Arbeitsgruppe um Peter Fox von der Universität von Texas in San Antonio die Methode bei einer sprachlichen Assoziationsaufgabe an. Zunächst sollten die Probanden Objekte auf Bildern benennen, etwa einen Hund. Erwartungsgemäß war das Kleinhirn dabei aktiv, denn Sprechen erfordert komplexe Muskelkoordinationen. Dann aber sollten die Versuchspersonen zu den Bildern ein passendes Verb finden, wie zu einem Hund das Wort „bellen“. Zur Verwunderung der Forscher war das Kleinhirn beim Nennen des Verbs viel stärker aktiv als beim Substantiv. Da die Anforderung an die Motorik für das Sprechen wohl bei beiden Aufgaben gleich groß war, musste die Mehraktivität im Kleinhirn durch die zusätzliche Assoziationsleistung zu Stande gekommen sein, so schlossen die Wissenschaftler. Offenbar beteiligte sich das Kleinhirn bei diesen sequenziellen Denkaufgaben (vie- ▶

Literaturhinweise

Gehirngespinste. Neuroanatomie für kybernetisch Interessierte. Von Valentin Braitenberg. Springer Verlag, Berlin 1973.

A role for the Cerebellum in Learning Movement Coordination. Von W. T. Thach in: Neurobiology of Learning and Memory, Bd. 70, S. 177 (1998).

The Detection and Generation of Sequences as a Key to Cerebellar Function. Experiments and Theory. Von Valentin Braitenberg, Detlef Heck und Fahad Sultan in: Behavioural and Brain Sciences, Bd. 20, S. 229 (1997).

The Cerebellum and Cognition. Hrsg. von Jeremy D. Schmahmann. Academic Press, San Diego 1997.

IMAGINE / CORBIS



Ohne langjähriges Training könnte das Kleinhirn nicht die Hochpräzision des Bewegungsablaufs erbringen, dank derer hier Michael Jordan den Ball ins Netz befördert.

le Tätigkeitswörter beinhalten ja gedachte Handlungssequenzen).

Würde das Kleinhirn auch bei anderen geistigen Tätigkeiten mitarbeiten? Zusammen mit James Bower vom California Institute of Technology in Pasadena untersuchte das Team von Fox dies 1996 mit Tastexperimenten. Die Probanden sollten Objekte in einem Beutel entweder nur aufheben und wieder fallen lassen. Oder sie sollten die Objekte, die verschieden raue Oberflächen hatten, anfassen und mit den Fingern voneinander unterscheiden. Wieder erschien den Forschern die motorische Leistung in beiden Fällen vergleichbar. Auch bei dieser Aufgabe war das Kleinhirn beim Ertasten der Oberflächenstruktur viel aktiver als beim Anfassen allein – für Fox und seine Kollegen ein Zeichen, dass das Kleinhirn auch wichtige Aufgaben bei der Wahrnehmung übernimmt.

An Sprache beteiligt

Diese und andere verblüffenden Befunde regten etliche Arbeitsgruppen zu einer Reihe weiterer Studien über eine Beteiligung des Kleinhirns an höheren geistigen Leistungen an. Mehrfach bestätigten Forscher, dass dieser Gehirnteil bisher unterschätzt wurde. Doch bei aller Faszination regte sich auch Kritik an vorschnellen und zu weit reichenden Schlussfolgerungen. Bei solchen Deutungen kann man nicht vorsichtig genug sein. Es ist nämlich viel schwerer, als man meinen sollte, Verhaltensversuche zu entwerfen, bei denen sich geistige von rein motorischen Vorgängen eindeutig trennen lassen. Ein Objekt zu ergreifen, anzuheben und fallen zu lassen ist von den Bewegungen her nicht das Gleiche wie es anzufassen und zu betasten. Auch dürfte Ersteres im Alltag öfter vorkommen, darum eingeübter sein und deshalb dem Kleinhirn weniger Anstrengung abverlangen.

Die Arbeitsgruppe um Fox begegnete der Kritik mit einem weiteren Experiment. Diesmal durften die Probanden im zweiten Versuch nicht selbst tasten, sondern die zu unterscheidenden Objekte wurden an ihren Fingerkuppen gerieben. Aber sogar das erzeugte eine höhere Kleinhirnaktivität als das Heben und Fallenlassen. Das spricht für die Deutung dieser Wissenschaftler, dass das Kleinhirn wirklich noch anderes leistet als früher angenommen. Auch diese Wahrnehmungsleistung könnte man als eine sensorische Unterscheidung von Sequenzen interpretieren.

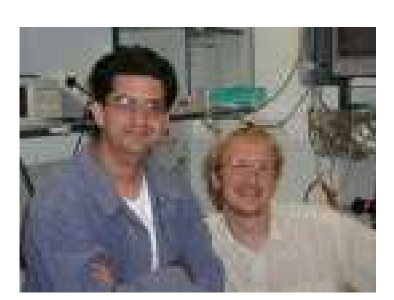
Doch wenn das Kleinhirn auch mit der Wahrnehmung und mit Assoziationen befasst ist – leiden Kleinhirnpatienten dann an intellektuellen Defiziten? Erfreulicherweise konnten Wissenschaftler dies in mehreren Studien eindeutig widerlegen. Im Intelligenzquotienten unterscheiden die Patienten sich von anderen Testpersonen überhaupt nicht, so demonstrierte das etwa die Arbeitsgruppe um Irene Daum und Hermann Ackermann von der Universität Tübingen.

Hingegen zeigten diese Forscher, dass Kleinhirnkranke bestimmte Sprachlaute schwerer unterscheiden können. Immer dann, wenn man in einer gehörten Silbe die Dauer eines Intervalls präzise erkennen muss, das weniger als hundert Millisekunden beträgt, bekommen solche Menschen Schwierigkeiten. Zum Beispiel dauert im Wort „Boten“ die Pause nach dem „o“ etwas länger als bei „Boden“. Spielt man Gesunden eine Aufnahme des Wortes „Boden“ vor und verlängert diese Pause elektronisch um ein bestimmtes winziges Maß, hören sie stattdessen „Boten“. Kleinhirnkranke vermögen die beiden Wörter allein an dieser Pause von vornherein nicht zu unterscheiden. Im Alltag behindert sie das allerdings gewöhnlich kaum, denn Sprache enthält genügend redundante akustische Signale, um den Defekt auszugleichen.

Die Erkenntnisse der letzten Jahre haben unser Verständnis vom Kleinhirn nicht nur erweitert, sondern auch grundlegend verändert. Wegen der anatomischen Verbindungen hatten Hirnforscher schon länger vermutet, dass das Cerebellum außer für schnelle Bewegungen auch für manche so genannten höheren Hirnfunktionen wichtig sein könnte. Hierfür mehren sich nun Hinweise.

In neuem Licht erscheint das Kleinhirn, seit wir den Sinn seiner hoch geordneten Anatomie zu verstehen beginnen. Trotzdem bleiben auch zur Erzeugung von Bewegungen noch viele Fragen zu klären. Wie etwa – und auf welchen Bahnen – gehen die Signale aus dem Kleinhirn in die Steuerung von Bewegungsabläufen durch das Gesamtnervensystem ein? Genaues wissen wir darüber bisher sehr wenig. Fest steht nur, dass es den motorischen Zentren der Großhirnrinde auf dem Weg über den Thalamus ständig Informationen liefert. Was dann damit geschieht – wie das Großhirn die Signale bei der Bewegungsplanung und -steuerung einbezieht –, ist eine besonders spannende Frage.

Die neuen Erkenntnisse regen an, nun die Interaktionen des Kleinhirns mit den verschiedenen Arealen der Großhirnrinde gründlicher zu untersuchen. Hiervon erwarten wir in Zukunft wesentliche neue Einsichten in die Gesamtorganisation des Gehirns. ■



Detlef Heck und **Fahad Sultan** *promovierten an der Universität Tübingen mit Arbeiten über das Kleinhirn. Heck (rechts) leitet an der Universität Freiburg in der Fakultät für Biologie eine neurobiologische Arbeitsgruppe. Sultan arbeitet an der medizinischen Fakultät der Universität Tübingen in der Abteilung für kognitive Neurologie.*



Sprechende Hände

Von Gregory Hickok, Ursula Bellugi und Edward S. Klima

Ein stiller Kampf tobt in Deutschland. Weitgehend unbeachtet von der Öffentlichkeit ringen Gehörlose seit Jahren um die offizielle Anerkennung ihrer Sprache – gegen den erbitterten Widerstand von Pädagogen. Denn noch immer halten zahlreiche Lehrer die Deutsche Gebärdensprache – zu Unrecht – für ein unvollständiges System willkürlicher Zeichen, mit dem sich allenfalls einfache Gedanken ausdrücken lassen. Unterstützung erfahren die Gehörlosen von Sprachwissenschaftlern und Hirnforschern, die eigentlich ein ganz anderes Ziel vor Augen haben: Sie wollen wissen, wie das menschliche Gehirn Sprache produziert und verarbeitet.

Auch hier beschränkten sich die Studien zunächst auf Lautsprachen wie Deutsch, Englisch oder Französisch. Seit der Mitte des 19. Jahrhunderts gelangen den Wissenschaftlern große Fortschritte bei der Lokalisierung von Hirnzentren, die an der Sprachentstehung und -verarbeitung beteiligt sind. So entdeckte der französische Neurologe Paul Broca 1861, dass Patienten, die zwar Sprache verstanden, aber selbst nur mit Schwierigkeiten sprechen konnten, häufig Schäden in einem Teil der linken Gehirnhälfte aufwiesen, der heute als Broca-Zentrum bekannt ist. Dagegen ist bei Menschen, die zwar fließend reden können, jedoch Probleme mit dem Verstehen haben, für gewöhnlich eine andere Region in der linken Hemisphäre betroffen, wie der deutsche Arzt Carl Wernicke 1874 herausfand. Das Areal bekam nach ihm den Namen Wernicke-Zentrum.

Solche Sprachstörungen – so genannte Aphasien – entstehen zumeist durch Schäden in der linken Gehirnhälfte. Bei ähnlichen Defekten in der rechten Hemisphäre kommt es stattdessen eher zu schweren Beeinträchtigungen bei der Bearbeitung visuell-räumlicher Aufgaben. Die Patienten sind beispielsweise nicht mehr in der Lage, eine einfache Skizze nachzuzeichnen. Aus diesen Gründen wird der linken Hirnhälfte oft die Sprache zugeordnet und der rechten das räumliche Denken. Obwohl diese Zweiteilung die wahren Verhältnisse zu einfach darstellt, spiegelt sie doch einige der wichtigsten medizinischen Unterschiede zwischen Patienten mit links- beziehungsweise rechtsseitigen Hirnschäden wider.

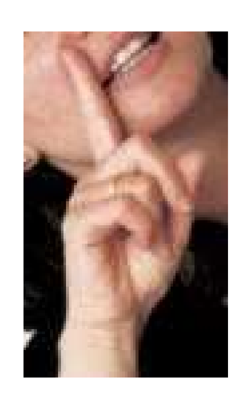
Dennoch bleiben viele Fragen offen – insbesondere, warum die Sprache sich ausgerechnet in diesen Arealen etabliert hat. Auf den ersten Blick erscheint das sogar sinnvoll: Das Wernicke-Zentrum ist als wichtige Region für Sprachverständnis dicht an der Hörrinde lokalisiert, das an der Sprachproduktion beteiligte Broca-Zentrum ist ein Nachbar der motorischen Rinde, welche die Muskeln von Mund und Lippen kontrolliert. Aber orientiert sich die Organisation der Sprache im Gehirn tatsächlich am Hören und Sprechen?

Vielsagende Gebärdensysteme

Ein möglicher Weg zu einer fundierten Antwort wäre die Untersuchung einer Sprache, die über andere sensorische und motorische Kanäle läuft. Lesen setzt zwar eine visuelle – oder bei Braille-Schrift taktile – Informationsaufnahme voraus, und Schreiben erfordert Bewegungen der Hand. Doch bei den meisten Menschen hängen diese Aktivitäten zumindest teilweise von Hirnregionen ab, die mit dem Gebrauch von Lautsprache verknüpft sind. Die Gebärdensprache der Gehörlosen erfüllt hingegen exakt die Wünsche der Wissenschaftler. Im Laufe der vergangenen zwei Jahrzehnte haben wir daher Gruppen gehörloser Gebärdender untersucht, die – meist infolge eines Schlaganfalls – Schäden an der linken oder rechten Hirnhälfte erlitten hatten. Indem wir ihre Fähigkeiten, Gebärden zu verstehen oder selbst zu produzieren, erforschten, näherten wir uns der Frage, ob Gebärdensprache und Lautsprache in ▶



Nicht nur der Mund kann reden, auch die Hände können es. Die Gebärdensprachen der Gehörlosen liefern neue Erkenntnisse darüber, wie das Gehirn mit Sprache umgeht.



Diese Stellung der Hände und Finger bedeutet in der Deutschen Gebärdensprache das Wort „Gebärden“ oder die Tätigkeit „gebärden“.

Auch die Mimik „spricht“ mit





Ebenso wie Lautsprachen verfügen auch Gebärdensprachen über hierarchische linguistische Strukturen. Diese wählen aus der Vielfalt möglicher Bewegungen eine beschränkte Anzahl von Grundelementen aus und setzen Rahmenbedingungen für den Kommunikationscode. So hängt die Bedeutung einer Gebärde ab von der Handform, der Handstellung, der Bewegung und dem Ausführungsort relativ zum Körper des Erzählers. Die Gebärde für „Dorf“ wird zum Beispiel an der Körperseite ausgeführt, „Sohn“ hingegen vor dem Rumpf. Für „suchen“ (*a*) vollzieht die Hand zwei Kreisbewegungen, bei „sitzen“ (*b*) nur einen kurzen Ruck nach unten. Zeigt der Handrücken des Erzählers nach vorne, während er den ausgestreckten Zeigefinger neben der Nase abwärts zieht, ist er „traurig“ (*c*). Ist die Hand jedoch um ihre Längsachse gedreht, meint er „Pfennige“ (*d*). Diese so genannten phonologischen Unterscheidungen stellen die kleinsten bedeutungsunterscheidenden Formteile dar (in Lautsprache sind das zum Beispiel die Anfangsbuchstaben bei den beiden Wörtern „Tanne“ und „Kanne“).

Die kleinsten bedeutungstragenden Strukturen sind Morpheme. In deutscher Lautsprache handelt es sich häufig um vorgestellte oder angehängte Silben wie „ge-“ oder „-lich“. Das Wort „Kind“ erfährt durch die Endung „-lich“ in „kindlich“ eine veränderte

den gleichen Bereichen des Gehirns interpretiert und generiert werden.

Zur Gebärdensprache gibt es eine Vielzahl falscher Vorstellungen. Bis weit in das letzte Jahrhundert hinein glaubten selbst Gehörlose, es handle sich lediglich um eine lockere Ansammlung von pantomimischen Zeichen, die nur für primitive Ansprüche ausreichten. Doch inzwischen haben Linguisten längst nachgewiesen, dass Gebärdensprachen strukturierte Kommunikationssysteme sind, deren Grammatik ebenso komplex ist wie die der Lautsprachen. Mit Gebärden lassen sich beliebig abstrakte und anspruchsvolle Gedanken ausdrücken – vom Liebesgedicht bis zur Quantenmechanik. Die Bildung der Gebärden und Sätze folgt dabei bestimmten Regeln, so wie es auch bei gesprochenen Sprachen der Fall ist. Allerdings ist die Deutsche Gebärdensprache (DGS) nicht einfach eine manuelle Version des Deutschen. Sie folgt einer eigenen, ganz anders aufgebauten Grammatik. Beispielsweise steht das Verb in DGS am Ende des Satzes, und anstelle von Pronomen werden Positionen im Raum genutzt.

Entgegen einer weit verbreiteten Annahme gibt es keine globale Gebärdensprache. Jede Nation hat ihre eigene, und innerhalb eines Landes kommen unterschiedliche Dialekte vor. Die Deutsche Gebärdensprache kennt wohl ebenso viele regionale Varianten für „grün“, wie es Wörter für „Brötchen“ im Deutschen gibt. Wenn ein Gehörloser eine fremde Gebärdensprache wie zum Beispiel American Sign Language (ASL) erlernt, benutzt er sie oft mit einem Akzent.

Gemeinsam sind den gebärdeten und gesprochenen Sprachen die abstrakten Merkmale von Sprache. Den auffälligsten Unterschied macht die Art und Weise aus, wie sie nach außen dargeboten werden: Lautsprachen codieren ihre Information in zeitlich-akustischen Veränderungen, Gebärdensprachen stützen sich dagegen auf visuell-räumliche Muster. Wie wirkt sich dieser Formunterschied auf die neurale Organisation im Gehirn aus?

Denkbar wäre, dass Gebärdensprache von den Systemen der rechten statt der linken Hirnhälfte bearbeitet wird, da es sich ja um Signale mit visuell-räumlichem Charakter handelt. Nach dieser Hypothese könnte das dem Wernicke-Zentrum entsprechende Areal für Gebärdensprache nahe an den Hirnregionen für die Verarbeitung optischer Reize sitzen. Das Gegenstück des Broca-Zentrums läge dann unweit der motorischen Rinde, die Bewegungen der Hände und Arme kontrolliert.

Als wir in den achtziger Jahren begannen, diese Hypothese zu testen, mussten zunächst zwei grundlegende Fragen beantwortet werden: Zeigen gehörlose Gebärdende mit Hirnschädigungen Probleme im Umgang mit der Gebärdensprache? Falls ja, erinnern die Defizite an Wernicke-Aphasien (Verständnisprobleme und fehleranfällige Sprache) oder Broca-Aphasien (gutes Verstehen, aber Schwierigkeiten, selbst flüssig zu sprechen)? Die Antwort war in beiden Fällen ein eindeutiges „Ja“. Einer der ersten Patienten, den unsere Gruppe untersuchte, gebärdete fließend nach den grammatischen Regeln der ASL, doch oft waren seine Mitteilungen zusammenhangslos. Dies und seine mangelnde Fähigkeit, die Gebärden anderer Menschen zu verste-

Glossar

Deutsche Gebärdensprache (DGS): Eine natürliche und vollwertige Sprache auf visueller Basis. Die DGS verfügt über ein eigenes Vokabular und eine eigene Grammatik.

Lautsprachbegleitende Gebärden (LBG): Ein manuelles System, bei dem jedes Wort der gesprochenen Sprache durch eine Gebärde dargestellt wird. LBG nutzen zum großen Teil die Gebärden der DGS, folgen aber der deutschen Grammatik.

Pantomime: Eine künstlerische Darstellungsform, die Handlung und/oder Charaktere durch Mimik, Gestik und Körpersprache ausdrückt. Im Gegensatz zu Sprache fehlt ihr ein einheitliches Regelwerk.

Bedeutung. Die Deutsche Gebärdensprache gestattet ebenfalls entsprechende Modifikationen, die sich meistens durch ein neues räumliches Muster auszeichnen. Die einfache Handbewegung für „geben“ in einer rollenden Kreisbewegung bedeutet „immer wieder und wieder geben“. In einem horizontalen Halbkreis geführt erweitert sie das Verb zu „jedem geben“. Andere Varianten drücken „jedem Einzelnen geben“, „sich gegenseitig geben“ usw. aus.

Auf der syntaktischen Ebene hat die Deutsche Gebärdensprache teilweise ganz andere Optionen als gesprochenes Deutsch. In der Lautsprache kann die Reihenfolge der Worte entscheidend für die Bedeutung sein. Es macht einen Unterschied, ob es heißt „Alice fragt Bob“ oder „Bob fragt Alice“. Beim Gebärden wird der Erzähler den beiden Personen bestimmte Orte im Raum zuordnen und die Gebärde für das Verb vom fiktiven Standpunkt des Fragers zu dem des Befragten ausführen. Diese Nutzung des Gebärdenraums kann bei Beschreibungen von Gesprächen mit mehreren Personen recht komplex ablaufen.





Neben den Händen ist die Mimik ein mächtiges Ausdrucksmittel der meisten Gebärdensprachen. Allein die Augenbrauen können aus einer Aussage eine Frage oder eine Aufforderung machen. Und bei völlig identischen Handbewegungen informiert nur die Mimik darüber, ob jemand etwas mit Interesse liest oder sich langweilt.

hen, erinnerten stark an Symptome hörender Menschen mit Wernicke-Aphasie.

Eine andere Patientin hatte extreme Probleme, Gebärden zu produzieren. Fast jedesmal kämpfte sie um die richtige Form und Stellung der Hand. Die meisten ihrer Äußerungen beschränkten sich auf eine einzelne Gebärde. Der Grund lag nicht einfach in Schwierigkeiten bei der motorischen Kontrolle: Bat man sie, Strichzeichnungen abzumalen, die zum Beispiel einen Elefanten oder eine Blume darstellten, bewältigte sie die Aufgabe sehr gut. Außerdem verstand sie Gebärdensprache hervorragend, ungeachtet ihrer Unsicherheiten beim Selbst-Erzählen. Kurz, ihre sprachlichen Fähigkeiten zeigten Parallelen zu den Symptomen einer Broca-Aphasie.

Als wir nach den für die Gebärdensprach-Aphasien verantwortlichen Hirnzentren suchten, erlebten wir eine Überraschung: Beide Patienten hatten Läsionen in der linken Hemisphäre und zwar genau dort, wo die Störungen auch bei hörenden Patienten mit vergleichbaren Problemen auftreten. Der Defekt beim Gebärdenden mit Verständnisschwierigkeiten betraf also unter anderem das Wernicke-Zentrum, und die Patientin, die kaum selbst gebärden konnte, hatte Schäden im Broca-Zentrum.

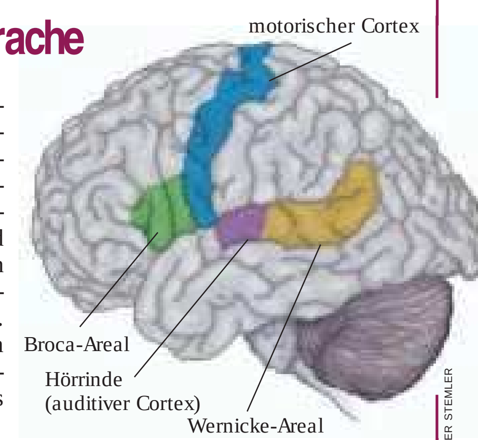
Diese Beobachtungen zeigen, dass die linke Gehirnhälfte eine wesentliche Rolle bei der Bearbeitung von Gebärdensprache spielt. Doch wie sieht es mit der rechten Hälfte aus? Sollten Schäden in dieser Hemisphäre, die ja nach dem derzeitigen Wissensstand unverzichtbar für viele visuell-räumliche Aufgaben ist, nicht ebenfalls einen verheerenden Einfluss auf die Gebärdensprachkompetenz haben?

Anscheinend ist dem nicht so. Gehörlose mit Defekten in der rechten Hirnhälfte führten ihre Gebärden schnell, flüssig und exakt aus, wobei sie die korrekte Grammatik anwandten. Außerdem verstanden sie mit Leichtigkeit die Gebärden anderer Erzähler. Sogar wenn der Hirnschaden die nichtsprachlichen visuell-räumlichen Fähigkeiten eines Patienten schwer beeinträchtigte, hatte dies keine Auswirkungen auf die Gebärdensprache. In einem Fall konnte der Patient zum Beispiel keine erkennbaren Zeichnungen anfertigen oder nachmalen, und Objekte im linken Teil seines Gesichtsfeldes nahm er gar nicht wahr. Dennoch kommunizierte er sehr effektiv in Gebärdensprache.

Spätere Untersuchungen an größeren Gruppen gehörloser Gebärdender bestätigten die Ergebnisse der frühen Fallstudien. In einer 1996 veröffentlichten Arbeit verglich unser Team die Gebärdensprachkompetenz von dreizehn Personen mit Hirnschäden auf der linken (*left hemisphere-damage*, LHD) und zehn Patienten mit Defekten auf der rechten Seite (*right hemisphere-damage*, RHD).

Die Heimat der Sprache

Zwei der wichtigen Regionen für die Sprachverarbeitung sind das Broca-Zentrum und das Wernicke-Zentrum in der linken Gehirnhälfte. Das Broca-Zentrum wird bei Hörenden aktiviert, wenn sie sprechen, und bei Gehörlosen, während sie gebärden. Das Wernicke-Zentrum ist am Vorgang des Verstehens beteiligt – sowohl bei Laut- als auch bei Gebärdensprachen.



Als Gruppe betrachtet schnitten die LHD-Gebärdenden bei einem weiten Spektrum von Gebärdensprachtests ziemlich schlecht ab: Sie hatten Probleme, einzelne Gebärden oder Sätze zu verstehen, und häufig auch Schwierigkeiten, flüssig zu erzählen. Nicht besser sah es aus, wenn sie Bilder benennen sollten. Oft unterliefen ihnen beim Ge-

bärden Handfehler: Sie vertauschten die Handformen oder eine Gebärde mit einer anderen. Hingegen bewältigten die RHD-Patienten alle Aufgaben gut. Die Studie wies auch nach, dass Probleme beim flüssigen Gebärden nicht durch allgemeinere Schwierigkeiten bei der Kontrolle willentlicher Hand- und Armbewegungen verursacht werden. Personen, die Mühe hatten, Gebärden zu formen, waren oft in der Lage, bedeutungslose Zeichen mit Hand und Arm durchzuführen.

Ähnliche Resultate brachte eine andere Versuchsreihe, die sich auf das Gebärdensprachverständnis konzentrierte. Auch unter diesen neunzehn Gebärdenden mit unterschiedlichen Hirnläsionen schnitt die LHD-Gruppe deutlich schlechter ab als die Gehörlosen mit rechtsseitigen Schäden. Die größten Probleme mit dem Verständnis einfacher Zeichen und ganzer Sätze hatten Patienten, deren linker Schläfenlappen betroffen war – jene Region, in der sich das Wernicke-Zentrum befindet.

Alles in allem besagen unsere Ergebnisse, dass die linke Hirnhälfte wichtiger ist für Gebärdensprache – genau wie für Lautsprache. Anscheinend beeinflusst die Art und Weise, in der eine Sprache aufgenommen und produziert wird, nicht

INTERVIEW

Vergebärdler: Lautlose Versprecher

Die Arbeitsgruppe von Professor Helen Leuninger von der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität in Frankfurt am Main untersucht neben Versprechern auch so genannte Vergebärdler.

***Spektrum der Wissenschaft:** Was ist für Sie so faszinierend daran, die sprachlichen Missgeschicke Ihrer sprechenden und gebärdenden Mitmenschen zu erforschen?*

Leuninger: Damit sich jemand verspricht oder vergebärdet, muss er schon über ein komplettes Sprachwissen verfügen. Unter bestimmten Bedingungen – wie zum Beispiel Stress – sind unsere kognitiven Fähigkeiten so sehr mit anderen Aufgaben beschäftigt, dass die Sprachproduktion mitunter labil ist. Dann wird plötzlich aus dem „weiblichen Fleischergesellen" ein „fleischlicher Weibergeselle". Daran sehen wir, dass das Wort keineswegs als feste Einheit dasteht, sondern aus Einzelteilen aufgebaut wird, die durcheinander geraten können. Derartige Fehlleistungen verraten viel über die Feinstruktur der Sprache.

***Spektrum:** Was erzählen Versprecher uns über die Organisation von Sprache im Gehirn?*

Leuninger: Sie offenbaren nicht nur etwas vom Ablauf, wie ein Gedanke seine sprachliche Form findet, sondern auch von der Speicherung sprachlicher Einheiten. So treten vertraute Wörter aus dem Alltag öfter in Versprechern auf, ein makabrer „Leichendiebstahl" wird schnell zum geläufigeren „Ladendiebstahl". Daneben ist die Formähnlichkeit eine weitere beliebte Falle. Ich selbst habe einmal unbeabsichtigt von einer „Angora pectoris" gesprochen. Wahrscheinlich haben wir also zwei Speicher – einen nach inhaltlichen Beziehungen und einen nach der Form organisiert. In diesen kann das Gehirn schneller und leichter auf die häufigeren Wörter zugreifen.

***Spektrum:** Und wie sieht es mit Vergebärdlern aus?*

Leuninger: Genauso. Wie bei Versprechern handelt es sich meist um Formfehler, die nur einen Aspekt betreffen: die Handform, den Ausführungsort, die Handstellung oder ihre Bewegung. Der Rest bleibt gleich. Es entsteht eine Gebärde, die zwar möglich ist, aber gewöhnlich keinen Sinn hat. Manchmal „vergisst" der Erzähler unter Stress etwa, die Handform zwischen den einzelnen Gebärden zu wechseln. So etwas gibt es auch in der Lautsprache, wenn ein Laut sich über die ganze Wortsequenz ausbreitet.



Professor Helen Leuninger im Gespräch

***Spektrum:** Wo liegt der Unterschied zwischen Sprachfehlern bei Aphasikern und Versprechern bzw. Vergebärdlern?*

Leuninger: Hauptsächlich in der Anzahl von Fehlern pro Einheit. Wenn Sie bei einem Austausch die „Wechselstaben verbuchten", sind das höchstens zwei Fehler. Bei aphasischen Fehlleistungen können jedoch fünf oder sechs Abweichungen auf einmal auftreten. Interessanterweise gerät da mitunter alles durcheinander – nur die Silbenstruktur nicht. Wir haben das ebenfalls bei Versprechern und Vergebärdlern beobachtet: Selbst wenn der Erzähler seinen Fehler noch während der Gebärde korrigiert, liegt die Anzahl der Silben nicht höher als bei dem eigentlich beabsichtigten Wort. Ich nehme an, dass die Silbenstruktur ganz fest im Gehirn verankert ist.

***Spektrum:** Welche Schlussfolgerungen ziehen Sie aus Ihren Forschungen zu Vergebärdlern?*

Leuninger: Laut- und Gebärdensprachen sind völlig vergleichbar in der Komplexität der Feinstruktur und der Mächtigkeit der Sprache. Das haben wir mit unseren Studien empirisch nachgewiesen. Im Bereich der Morphologie ist die Deutsche Gebärdensprache sogar viel komplexer aufgebaut als die deutsche Lautsprache. Mit einer einzigen Verbgebärde können Sie gleichzeitig bis zu neun Informationen vermitteln. Von der Struktur erinnert das mehr an ein Mischsystem aus spanischer und chinesischer Lautsprache. Die deutsche Laut- und Gebärdensprache haben dagegen eigentlich nichts miteinander gemeinsam, außer die geografische Verbreitung.

Unsere Ergebnisse haben zudem eine politische Bedeutung. Bei der Anerkennung der Deutschen Gebärdensprache im Land Hessen haben sie eine wichtige Rolle gespielt, weil sie nachprüfbare Fakten auf den Tisch brachten. Die Anerkennung auf Bundesebene steht übrigens immer noch aus.

*Die Fragen stellte **Dr. Olaf Fritsche**, Wissenschaftsjournalist aus Heidelberg.*

sonderlich ihre Organisation im Gehirn. Doch wie bereits angedeutet, ist die Annahme eines funktionell zweigeteilten Gehirns – mit sprachlichen Fähigkeiten vorwiegend in der linken und visuell-räumlichen Zentren hauptsächlich in der rechten Hälfte – allzu einfach. Die Forschung in den letzten Jahrzehnten hat gezeigt, dass die meisten kognitiven Leistungen sich in viele einzelne Arbeitsschritte zerlegen lassen. Bei einigen davon mag die Aktivität nur auf einer Seite stattfinden, während andere beide Hemisphären beanspruchen.

Das Sprachvermögen setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Eine hörende Person muss zum Beispiel die einzelnen Sprachlaute und daraus aufgebaute Wörter aufnehmen und produzieren können. Andernfalls wäre es unmöglich, „Tasse“ von „Kasse“ zu unterscheiden. Außerdem muss sie in der Lage sein, morphologische Zusätze zu erkennen („Kindheit“ statt „Kind“), syntaktische Konstruktionen („Der Hund jagte die Katze“ im Gegensatz zu „Der Hund wurde von der Katze gejagt“) sowie lautliche Betonungen („das Weiße Haus“ statt „das weiße Haus“). Schließlich verlangt ein längeres Gespräch die Fähigkeit, verlässliche Beziehungen zwischen Personen und Ereignissen zu konstruieren und über viele Sätze beizubehalten.

Von all diesen Einzelaspekten sprachlicher Leistung beschränkt sich die Produktion der Sprache am stärksten auf die linke Hirnhälfte. Schäden in diesem Teil beeinträchtigen oft die Fähigkeit, beim Sprechen passende Laute auszuwählen und zu Worten zu verbinden. Defekte in der rechten Hälfte des Gehirns wirken sich selten so aus. Die Aufnahme und das Verstehen von Sprache scheinen weniger streng an die linke Hirnhälfte gebunden zu sein.





Ein häufiges Problem bei Gebärdenden mit Schäden in der linken Hirnhälfte sind sprachliche Ausrutscher. Die Abbildung demonstriert die korrekte amerikanische Gebärde für „gut“ (oben), das Bild darunter die fehlerhafte Ausführung wie bei einer Patientin mit linksseitigem Hirndefekt. Der Ort und die Bewegung stimmen, aber die Handform ist falsch. Es entsteht eine Gebärde, die in amerikanischer Gebärdensprache zwar möglich ist, jedoch so nichts bedeutet. Auch wenn die Handform in diesem Zusammenhang falsch ist, kommt sie bei anderen amerikanischen Gebärden vor, zum Beispiel bei „Spiel“ und „Kalifornien“. Ähnliche Ausrutscher betreffen die Orientierung der Hand, die Bewegung und den Ausführungsort, oder sie verzerren die morphologische und syntaktische Struktur der Sprache.

Defekte der linken Gehirnhälfte

Beide Hemisphären sind fähig, zwischen einzelnen Sprechlauten zu unterscheiden, und anscheinend spielt die rechte Seite des Gehirns eine Rolle beim Führen zusammenhängender Gespräche. Patienten mit Schäden im rechten Hirnteil mögen noch ziemlich gut Wörter und Sätze bilden können, aber sie stolpern häufig von einem Thema zum nächsten, wobei allenfalls ein dünner Faden das Ganze verbindet.

Das Entschlüsseln der Bedeutung von Wörtern und Sätzen obliegt jedoch offenbar der linken Hemisphäre. Dies erklärt, warum man lange Zeit annahm, Sprache sei ausschließlich linksseitig angesiedelt. Die gebräuchlichsten Aphasie-Tests bewerteten nämlich die Produktion und das Verstehen von Wörtern und Sätzen, nicht die Gesprächsführung. Auch die nichtsprachlichen räumlichen Fähigkeiten können in Komponenten mit unterschiedlichen Verteilungsmustern zwischen den Hirnhälften zerlegt werden. Obwohl bei hörenden wie gehörlosen Personen die schwersten Störungen der Raumwahrnehmung meist infolge von rechtsseitigen Schäden auftraten, haben Wissenschaftler auch bei Hörenden mit linksseitigen Defekten einige Defizite bei visuell-räumlichen Aufgaben beobachtet.

Die Patienten können zwar die Gesamterscheinung einer Skizze erkennen oder reproduzieren, haben aber Schwierigkeiten, deren räumliche Eigenschaften, also ihre Details, aufzunehmen oder nachzuzeichnen. Bei Personen mit Schädigungen in der rechten Hemisphäre ist es eher umgekehrt. Daher nahmen Forscher an, die linke Hirnhälfte sei wichtig für das Wahrnehmen und Verändern räumlicher Details, während die rechte Seite des Gehirns für Prozesse auf globaler Ebene notwendig sei.

Dieses anspruchsvollere Bild des Gehirns wirft eine interessante Frage auf: Hängt die Verteilung der visuell-räumlichen Fähigkeiten auf die beiden Hirnhälften – Details links, Überblick rechts – mit unterschiedlichen Kompetenzen beim Gebärden zusammen? Wenn man die einzelnen Gebärden und Sätze als Bausteine der Sprache ansieht, kann ein ausführliches Gespräch als Modell dafür dienen, wie die Stücke ein Ganzes bilden. Möglicherweise dominiert die linke Hälfte des Gehirns deshalb die Bildung und das Verstehen von Gebärden und Sätzen, weil diese Prozesse von räumlichen Fähigkeiten auf lokaler Ebene abhängen. Und vielleicht beherrscht die rechte Hirnhälfte darum den Ablauf zusammenhängender Konversation in Gebärdensprache, weil der Vorgang auf einer globalen Stufe angesiedelt ist.

Wir überprüften diese Hypothese experimentell. Tatsächlich hatten viele Gebärdende mit Defekten im rechten Hirnteil Probleme bei Gesprächen. Ihre Erzählungen strotzten von Randbemerkungen und Nebensächlichkeiten – die gleichen Merkmale wie bei hörenden Patienten. Aber in einigen Fällen kam ein neues Problem hinzu: Bei Erzählungen mit mehreren Personen nutzt ein gesunder Gebärdender den umgebenden Raum, indem er die einzelnen Charaktere seiner Geschichte bestimmten Positionen zu- ▶







Kommen in einer Erzählung mehrere Personen vor, werden ihnen im Gebärdenraum Positionen zugeordnet, auf die der Gebärdende Bezug nimmt. Die Erzählerin stellt einen Mann (*a*) auf ihre rechte Seite (*b*) und eine Frau (*c*) auf die linke (*d*). Dann führt sie die Hand mit der Form für „fragen" von der Position des Mannes zum Ort der Frau (*e*). In Deutsch bedeutet diese Sequenz: „Der Mann fragt die Frau etwas." Bei einem Hirnschaden in der rechten Hemisphäre können manche Gebärdende zwar noch die Personen im Gebärdenraum verteilen wie in den Abbildungen *a* bis *d* gezeigt. Doch dann nutzen sie dies nicht weiter. In dem konstruierten Beispiel führt die Erzählerin zwar noch die Gebärde für „fragen" aus, lässt sie jedoch nicht an einem der Referenzpunkte beginnen oder enden (*f*). In Deutsch entspräche das etwa den Aussagen: „Ein Mann und eine Frau stehen einander gegenüber. Dann fragt jemand einen anderen etwas."

ordnet. Im weiteren Verlauf verweist er auf diese Stellen, wenn die entsprechende Person gemeint ist. Wir fanden in unserer Studie heraus, dass manche Gehörlose mit rechtsseitigem Hirnschaden in ihren Erzählungen beim Thema bleiben, aber kein konsistentes Netz von Personen im Gebärdenraum erstellen und aufrechterhalten konnten.

Hängt eine dieser Schwierigkeiten bei der Gesprächsführung mit Defiziten in der nichtsprachlichen räumlichen Kompetenz zusammen? Anscheinend nicht. Einer unserer Patienten mit RHD hatte trotz starker Einschränkung seiner räumlichen Fähigkeiten keine Probleme, eine zusammenhängende Geschichte zu gebärden. Ein anderer, dessen visuell-räumliches Vermögen nur wenig gestört war, vermochte keinen passenden Rahmen für seine Charaktere zu wahren. Offensichtlich sind die kognitiven Systeme der rechten Gehirnhälfte für nichtsprachliche räumliche Aufgaben getrennt von den Bereichen für Gespräche.

Wie sieht es bei Gehörlosen aus, die einen Defekt in der linken Hemisphäre haben? Sind deren Gebärdensprach-Aphasien durch Störungen der lokalen räumlichen Fähigkeiten bedingt? Um dies zu klären, baten wir eine LHD-Gruppe, Strichzeichnungen und hierarchisch aufgebaute Muster abzumalen. Alle Vorlagen hatten lokale und globale Eigenschaften, die leicht zu unterscheiden waren – zum Beispiel war ein großer Buchstabe „D" aus lauter kleinen Buchstaben „y" aufgebaut. Wie bei hörenden Personen mit linksseitigem Hirnschaden neigten auch die Gehörlosen dazu, die Gesamterscheinung des Bildes richtig wiederzugeben, dabei aber häufig einige Details wegzulassen. (Eine Gruppe mit rechtsseitigem Defekt machte es genau entgegengesetzt: Ihre Skizzen waren voller Details, insgesamt aber ohne Konzept.) Einen Zusammenhang zwischen dem Grad der räumlichen Defizite auf lokaler Ebene und dem Ausmaß der Gebärdensprach-Aphasie konnten wir nicht finden. Entgegen der Erwartung ist die Fähigkeit von gebärdenden Muttersprachlern wohl unabhängig von ihrem nichtsprachlichen räumlichen Vermögen.

Möglicherweise haben wir einige feine Unterschiedungen bei der Organisation von Sprache im Gehirn Hörender und Gehörloser übersehen. Untersuchungen an Patienten mit Hirnläsionen haben nur eine begrenzte Genauigkeit. Um exakt festzustellen, welche Teile des Gehirns an der Kommunikation in Gebärdensprache beteiligt sind, müsste man Dutzende Gehörloser mit Defekten an genau den richtigen Stellen testen. Es würde Jahrzehnte dauern, sie auch nur ausfindig zu machen. Doch die Entwicklung nichtinvasiver Techniken in der Hirnforschung – funktionelle Kernspintomographie (fNMR für: *functional Nuclear Magnetic Resonance)* und Positronen-Emissionstomographie (PET) – hat den Wissenschaftlern neue Möglichkeiten an die Hand gegeben, um die neuronalen Wurzeln der Sprache zu ergründen.

Mit diesen bildgebenden Verfahren haben Forscher die Rolle des Broca-Zentrums bei der Produktion von Laut- und Gebärdensprache untersucht. Sie stellten fest, dass tatsächlich sowohl bei Hörenden, die sprechen, als auch bei Gehörlosen, die gebärden, das Broca-Zentrum aktiv ist. Außerdem bestätigten die Bilder, dass es sich bei den Regionen für das Ver-

Literaturhinweise

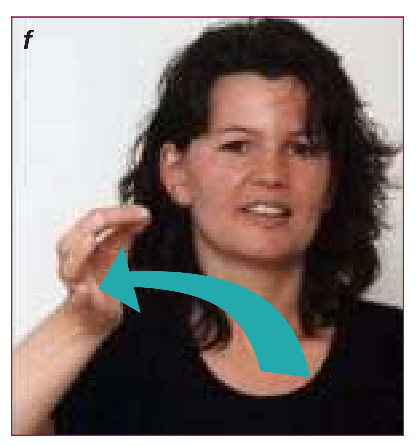
Ich sehe was, was Du nicht hörst. Von D. Happ et al. in: Forschung Frankfurt, Nr. 3, 1998, S. 4.

Einführung in die Gebärdensprache und ihre Erforschung. Von Penny Boyes Braem. Signum Verlag, 3. Auflage 1995.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei **www.spektrum.de** *unter „Aktuelles Heft".*







stehen der Gebärdensprache im Wesentlichen um die gleichen Gebiete handelt, die auch bei gesprochener Sprache beteiligt sind. In einer Studie aus dem Jahre 1998 beobachteten Wissenschaftler mit fNMR Gehörlose, die sich Videofilme mit Sätzen in amerikanischer Gebärdensprache ansahen. Die Daten belegten Hirnaktivitäten in mehreren Teilen des linken Schläfenlappens, darunter Abschnitte des Wernicke-Zentrums, sowie in einigen Regionen im linken Stirnlappen, einschließlich des Broca-Zentrums.

Ein gemeinsames Sprachzentrum

Das Experiment zeigte zudem aktive Bereiche im rechten Schläfenlappen und linken Stirnlappen. Daraus haben einige Forscher geschlossen, das Verstehen von Gebärdensprache sei stärker bilateral organisiert als bei Lautsprachen. Aber auch an hörenden Personen, die Sprache aufnahmen, haben Wissenschaftler beidseitige Aktivitäten registriert. Es bedarf also noch weiterer Forschung, um die Rolle der rechten Hirnhälfte beim Verarbeiten von Gebärdensprache zu klären. In jedem Fall machen die Studien an Patienten mit Hirnläsionen deutlich, dass die Unterschiede zwischen gesprochener und Gebärdensprache allenfalls gering sind – falls sie überhaupt existieren.

Gebärdensprache umfasst sowohl linguistische als auch visuell-räumliche Verarbeitungsschritte – zwei Fähigkeiten, die bei Hörenden auf weitgehend getrennten neuralen Systeme beruhen. Entgegen früheren Vorstellungen hat die Organisation von Gebärdensprache im Gehirn mehr mit derjenigen von gesprochener Sprache gemeinsam als mit der bei visuell-räumlichen Prozessen. Woran könnte das liegen?

Unsere Arbeiten und die anderer Gruppen weisen darauf hin, dass es sich beim Gehirn um ein modular strukturiertes Organ handelt, dessen einzelne Einheiten jeweils für einen bestimmten Verarbeitungsschritt zuständig sind.

So gesehen überrascht es kaum, dass der Umgang mit Gebärdensprache anscheinend unabhängig ist von anderen visuell-räumlichen Fähigkeiten wie dem Abzeichnen einer Skizze. Trotz der visuellen Eingabe und manuellen Ausgabe handelt es sich hier doch um grundsätzlich verschiedene Aufgaben. Demzufolge sollte man erwarten, dass die peripheren Ebenen der Verarbeitung – zum Beispiel in der primären Sehrinde, welche die Signale vom Sehnerv erhält – zu einem gewissen Teil in den gleichen Hirnsystemen ablaufen und sich dann in zentraleren Systemen auf höherer Ebene aufspalten.

Genau umgekehrt ist die Situation bei gesprochener versus Gebärdensprache. Die beiden unterscheiden sich dramatisch bei der Ein- und Ausgabe, durchlaufen jedoch anscheinend die gleiche linguistische Verarbeitung. Wir erwarten deshalb, dass die Sprachtypen in den zentralen, höheren Ebenen des Gehirns große neurale Bereiche gemeinsam haben und auf den peripheren Stufen getrennte Wege gehen. So laufen diese Prozesse bei Lautsprache in der Hörrinde beider Hirnhälften ab, die ersten Schritte der Gebärdenverarbeitung hingegen in der Sehrinde. Jenseits der frühen Stufen scheinen die Signale aber durch zentrale linguistische Systeme zu gehen, die für Gebärden- und Lautsprache gleich organisiert sind.

Eine der wichtigsten Fragen bei zukünftigen Forschungsvorhaben wird sein, wo die peripheren Prozesse aufhören und die zentralen Verarbeitungsebenen beginnen – sofern es eine scharfe Grenze zwischen beiden gibt. Außerdem wissen wir noch immer viel zu wenig darüber, wie das Gehirn überhaupt die Signale auswertet oder erzeugt. Die Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen den beiden Sprachmodi bieten ideale Voraussetzungen, solche Probleme anzugehen.

In Deutschland und anderen Staaten, in welchen die nationalen Gebärdensprachen noch nicht als vollwertige Sprachen anerkannt sind, werden die Ergebnisse weiterhin auch politische Bedeutung haben – und damit unter Umständen entscheidenden Einfluss auf die Lebensumstände der Gehörlosen. Nur zögerlich hält Gebärdensprache in einzelnen Projektklassen an wenigen Gehörlosenschulen Einzug in den Unterricht. Eines der Hauptargumente von Gegnern dieser Entwicklung – es gäbe keine Sprache ohne Sprechen – haben die Forschungen bereits widerlegt. ■

Gregory Hickok *ist außerordentlicher Professor in der Abteilung für Kognitionswissenschaften an der Universität von Kalifornien in Irvine und Direktor des Laboratoriums für Kognitive Gehirnforschung.* **Ursula Bellugi** *leitet das Laboratorium für kognitive Neurowissenschaften am Salk-Institut in La Jolla, Kalifornien.* **Edward S. Klima** *ist emeritierter Professor an der Universität von Kalifornien in San Diego und forscht am Salk-Institut.* *An der Auswahl passender Gebärden für den deutschen Sprachraum war Juliane Klann von der Abteilung Neurolinguistik der RWTH Aachen beteiligt sowie die Gebärdensprachdozentin Claudia Rüger, die auch für die Fotos Modell stand.*

Grüne Gentechnik

Risiko oder Rettung?

Ein Segen für die Dritte Welt? Überflüssig, ja potenziell gefährlich? Zwei führende Experten in der Debatte um gentechnisch veränderte Nutzpflanzen stellen nach dieser Einführung in die Problematik ihre Argumente vor.

Von Hermann Englert

Vor kurzem ist in der jungen Disziplin der grünen Gentechnik der Ernstfall eingetreten: Kanadische Bauern entdeckten auf ihren Feldern Rapspflanzen, die gleich gegen drei wichtige Herbizide resistent sind. Die großen Agro-Biotech-Konzerne Monsanto, BASF und Syngenta (früher Aventis) vermarkten dort Rapssorten, die gegen je eines dieser Herbizide resistent sind. Diese Eigenschaft soll den Einsatz ökologisch verträglicherer Unkrautvernichtungsmittel ermöglichen, die aber gewöhnliche Rapssorten schädigen würden. Vereinzelt sind nun aber dreifachresistente Rapspflanzen als „Unkraut" zwischen anderen Saaten aufgetaucht – ein Produkt ungewollter Bestäubung über mehrere Pflanzengenerationen. Den Farmern bleibt nichts, als die Widerspenstigen auszurupfen oder mit harten chemischen Mitteln auszurotten. Die Canadian Royal Society befürchtet, dieser Raps könne eines der schlimmsten Unkraut-Probleme des Landes werden.

Auf der anderen Seite forderte eine ganze Reihe Königlicher und Wissenschaftlicher Akademien im letzten Jahr, weitere genetisch veränderte Nahrungspflanzen zu entwickeln, vor allem in den armen Ländern. Dort nämlich, schrieben brasilianische, chinesische, indische und mexikanische Wissenschaftler, brauche man die grüne Gentechnik, um Hunger und Mangelernährung zu bekämpfen. Auch die Weltgesundheitsorganisation (WHO) schlug kürzlich in dieselbe Kerbe: Auf der Erde hätten über 800 Millionen Menschen nicht genügend zu essen. Obwohl die Bevölkerung wächst, stagniere beispielsweise der Hektarertrag an Hirse in Schwarzafrika seit den sechziger Jahren. Grüne Gentechnik sei zwar nicht das einzige Mittel gegen dieses Problem, aber ein sehr wichtiges.

Wie riskant sind genveränderte Pflanzen und Lebensmittel nun wirklich? Aus wissenschaftlichen Studien zeichnet sich ab, dass die grüne Gentechnik nicht so gefährlich ist, wie ihre Widersacher an die Wand malen, jedoch auch nicht so harmlos, wie die Agro-Biotech-Konzerne beschwören. Während die Forscher noch diskutieren, sind auch im Jahr 2000 weltweit die Anbauflächen für Gen-Planzen gewachsen. Insgesamt 4,4 Millionen Hektar – die doppelte Fläche Großbritanniens – registrierte die ISAAA, eine unabhängige Vereinigung, die die Verbreitung biotechnologischer Methoden in Entwicklungsländern vorantreibt. Über zwei Drittel davon liegen in den USA. Deutschland rangiert weltweit an elfter Stelle und teilt sich mit neun anderen Ländern etwa ein Prozent der Fläche.

Ein orange-schwarzer Schmetterling ist das Sinnbild dafür, wie emotional befrachtet die Diskussion um die Gefahren der landwirtschaftlichen Gentechnik ist. Der Insektenkundler John Losey von der Cornell-Universität in Ithaka (Bundesstaat New York) fütterte in seinem Labor Raupen des Monarch-Falters mit Blättern der Hundswurz. Diese hatte er zuvor mit Pollen von so genanntem Bt-Mais überpudert. Bt steht für *Bacillus thuringiensis*, ein Bakterium, das für bestimmte Insektenarten tödliche Proteine produziert. Ver-

PETE MCARTHUR



Genmanipulierter Mais ist nur einer der strittigen Punkte in der Debatte um die grüne Gentechnik.

schiedene Agro-Biotech-Unternehmen hatten Mais mit einem entspechenden Gen ausgestattet. Er produziert dann in seinen Zellen das gleiche bakterielle Insektengift und bringt damit bestimmte Fraßfeinde um. Das tat sein Pollen auch mit den schwarz-weiß-gelb gestreiften Raupen des Monarch-Falters, die Mais aber in der Natur gar nicht fressen. Die toten Raupen-Schönheiten lösten einen Aufschrei bei Umweltschützern und hektische Forschungstätigkeit in den Labors aus.

Insgesamt zwanzig Teams machten sich an die Überprüfung von Loseys Ergebnissen. Haupt-Kritikpunkt: Solche Pollen-Mengen würden die Raupen in der Natur nie aufnehmen. Daher maßen Forscher von der Staatsuniversität von Iowa die Pollenkonzentration in verschiedenen Entfernungen von Maisfeldern. Ihr Ergebnis: Selbst in einem Meter Abstand finden sich zu wenig Pollen, um Raupen zu schädigen. Nur die Pollen der Mais-Sorte mit dem Bt-Gen Event 176 wirkten noch zwei Meter weit weg tödlich. Einige Ökologen lassen sich jedoch nicht beruhigen: Selbst wenn die Raupen nicht sterben, sondern sich zu Faltern entwickeln, argumentieren sie, könnte das Bt-Protein sie so schwächen, dass sie ihre herbstliche Wanderung nach Mexiko nicht überstehen.



Die US-Umweltschutzbehörde Environmental Protection Agency (EPA) hat nun von den Biotech-Unternehmen, die Bt-Sorten vermarkten, Daten angefordert, um die Bedenken der Gentech-Gegner möglichst auszuräumen. Bis zum Herbst will die EPA entscheiden, ob und welche Schritte zum Schutz des Monarch-Falters und anderer so genannter Nicht-Ziel-Organismen des Bt-Mais unternommen werden müssen. Dabei stellt sich inzwischen auch die Frage, ob Bt-Gift für den Menschen gefährlich ist. Es entfaltet bei ihm keine Giftwirkung, könnte aber nach öfterem Verzehr Allergien auslösen.

Kanada züchtet salzresistente Tomaten

Dafür, dass durch Gentransfer in Nahrungspflanzen eingebrachte Fremdproteine als Allergene wirken, gibt es bereits einen Präzedenzfall: 1996 übertrug die Firma Pioneer Hi-Bred International, eine Tochter des DuPont-Konzerns, das Gen für ein Protein aus der Paranuss in Futter-Soja, um dessen Nährstoffgehalt besser auszubalancieren. Da Paranüsse bei Menschen jedoch öfter allergische Reaktionen hervorrufen, testete die Universität Nebraska das modifizierte Soja. Resultat: Das Paranuss-Protein machte das Soja allergen.

Zwar lassen sich einige Allergie auslösende Proteine identifizieren, bevor sie direkt oder indirekt auf dem Esstisch landen. Doch seien viele Allergene noch nicht erkannt, sagen die Kritiker, sodass auch ein Vergleich mit Gendatenbanken bekannter Auslöser keine völlige Sicherheit biete. Befürworter propagieren für Gen-Nahrungsmittel daher ein ähnliches System wie bei der Zulassung von Medikamenten: standardisierte Tests vor der Marktzulassung und konstante Beobachtung von eventuell auftretenden Komplikationen nachher.

Das gilt auch für den „goldenen Reis“ des Schweizer Forschers Ingo Potrykus. Ihm und seinen Kollegen war es gelungen, in eine Reissorte ein ganzes Enzymsystem einzuführen, das aus Stoffwechselprodukten der Pflanzen Beta-Carotin herstellt. Diese Vorstufe von Vitamin A verleiht den Körnern ihren namensgebenden Goldton. Neben Eisen und Iod ist das Vitamin einer der Vitalstoffe, deren Mangel in armen Ländern am häufigsten zu ernsten Gesundheitsschäden oder gar Tod führt.

Die jüngste Meldung von einer viel versprechenden Nutzpflanze mit neuen Eigenschaften stammt ausgerechnet aus Kanada. In den Gewächshäusern von Hong-Xia Zhang und Eduardo Blumwald an der Universität Toronto wachsen Tomatenpflanzen, die ein Gen der Ackerschmalwand *(Arabidopsis thaliana)* salzresistent macht: Sie überleben in Nährlösungen, die zwanzigmal mehr Salz enthalten als Süßwasser. Dabei gelangt nur unwesentlich mehr davon in die Früchte als bei normalen Tomaten. Das Potenzial wird klar, wenn man bedenkt, dass etwa ein Viertel der weltweit bewässerten Agrarflächen zunehmend versalzen.

Doch auch hier erheben sich warnende Stimmen. Zum einen würden Nutzpflanzen, die gegen bestimmte Umweltbelastungen resistent sind, den Menschen zu sorglosem Umgang mit der Natur verleiten. Zum anderen – und hier wirft das Beispiel des dreifach-resistenten Gen-Rapses drohend seinen Schatten – könnte das Salztoleranz-Gen in die Natur entkommen. Dies kann entweder über Bestäubung verwandter Arten geschehen oder in Form von verwildernden Kultur-Tomaten, die dann empfindliche Ökosysteme wie Salzmarschen stören.

Die neue Richtlinie 2001/18/EG über die Freisetzung gentechnisch veränderter Organismen in die Umwelt, die alle Mitglieder der EU bis 2002 in nationales Recht umsetzen müssen, versucht den Unsicherheiten Rechnung zu tragen. Sie legt verstärkt Wert auf das Monitoring der Freisetzungs-Folgen und die Information der Öffentlichkeit. Mit dem Antrag auf Genehmigung muss jedes Unternehmen einen Plan vorlegen, wie es Geschehnisse im Zusammenhang mit den freigesetzten Organismen erfasst und dokumentiert. Zudem wird jede Genehmigung maximal für zehn Jahre erteilt. Danach ist ein Verlängerungsantrag nötig, der die Informationen aus den vorherigen Jahren berücksichtigt. Bereits erteilte Freisetzungsgenehmigungen sollen zeitlich befristet werden. Sämtliche gentechnisch veränderten Organismen, die in Verkehr gebracht werden, sind mit ihren Standorten zu erfassen. Auf Teile dieser Datenbanken hat die Öffentlichkeit Zugriff.

Auch eine kleine, eher psychologisch bedeutsame Änderung zeigt, dass die Behörden den Konsumenten ernster nehmen. Ladungen genmanipulierter landwirtschaftlicher Erzeugnisse trugen bisher den Vermerk „könnte gentechnisch veränderte Organismen enthalten“. Künftig wird er Klartext sprechen: „Enthält veränderte Organismen“.

Hermann Englert *ist Biologe mit Spezialgebiet Genetik. Er arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Frankfurt am Main.*

PRO

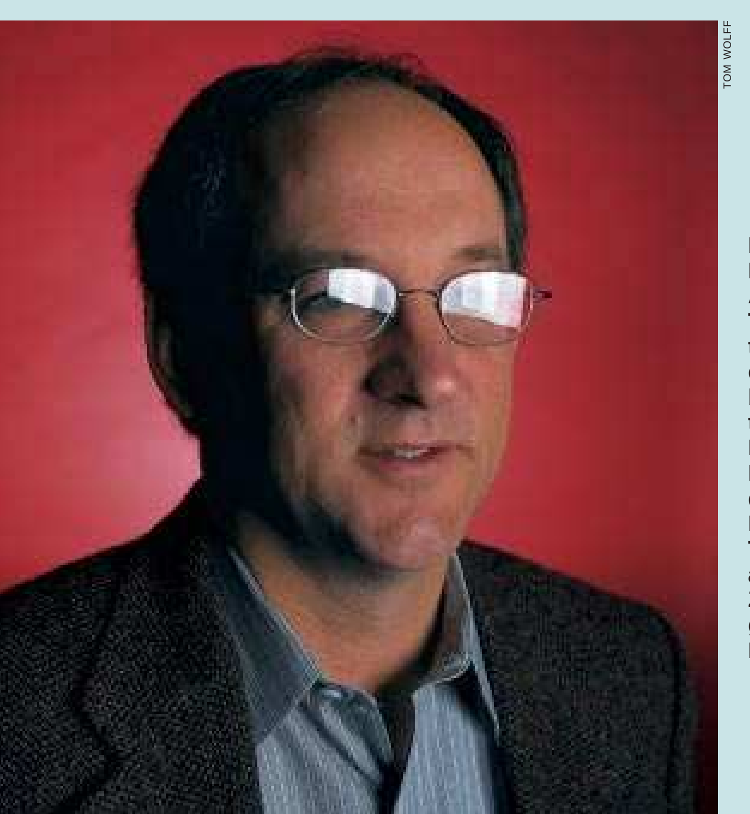
Braucht die Welt Genfood?

Interview mit Robert B. Horsch

Spektrum der Wissenschaft: Monsanto ist eines der am meisten kritisierten, ja geschmähten Unternehmen, weil es sich so stark in der Entwicklung genmanipulierter Nahrung engagiert. Verschweigen Sie manchmal ihre dortige Position vorsichtshalber gegenüber Fremden?
Robert Horsch: Hin und wieder habe ich schon negative Reaktionen erlebt, aber meist wissen die Leute in ihrem Verhalten schon zu unterscheiden zwischen mir als Person und dem großen, anonymen Unternehmen.

Könnte die Welt überhaupt auf grüne Gentechnik verzichten?
Die Biotechnologie ist ein großartiges Werkzeug, mit dem wir mehr Nahrungsmittel auf weniger Fläche produzieren können, noch dazu mit weniger Raubbau an den Wasservorräten und weniger Gefährdung der Artenvielfalt. Ich bin überzeugt davon, dass der Einsatz der Biotechnologie nicht nur wichtig, sondern zwingend notwendig ist, wenn wir den schnell wachsenden Bedarf an Nahrung und anderen landwirtschaftlichen Erzeugnissen decken wollen. Die Nachfrage nach Nahrungsmitteln wird in den nächsten 25 Jahren um mindestens 50 Prozent steigen, weil nicht nur die Bevölkerung wächst, sondern zusätzlich auch die Einkommen.

„Genfood"-Kritiker weisen nun aber darauf hin, dass wohl kein Unternehmen seine Produkte verschenken wird. Kann eine Firma wie Monsanto die Biotechnologie für Bauern in der Dritten Welt erschwinglich machen?
Erschließung der Absatzmärkte und technologische Hilfe für die Entwicklungsländer schließen einander nicht aus. Ein sehr erfolgreicher Ansatz ist die Segmentierung des Marktes in drei Bereiche. Zunächst ist da der rein kommerzielle Markt: Als gewinnorientiertes Unternehmen investieren wir sinnvollerweise dort in Produkte und Märkte, wo wir unsere Erzeugnisse auch verkaufen können und Gewinnchancen sehen. Am Gegenpol steht der nichtkommerzielle Technologietransfer, der weitestgehend auf eine Zusammenarbeit öffentlicher Träger ausgerichtet ist.



TOM WOLFF

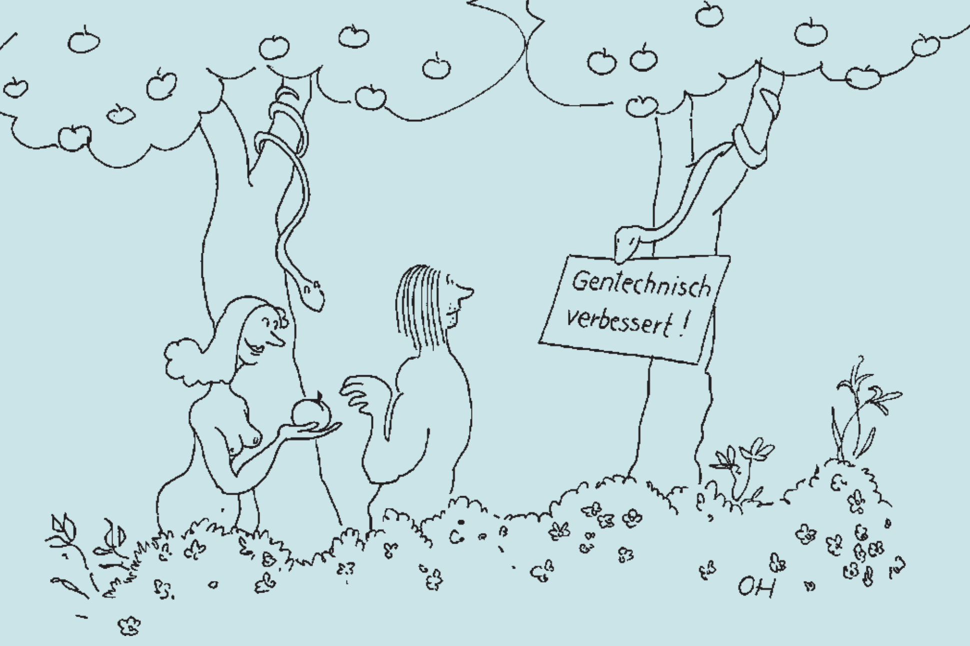
Dr. Robert B. Horsch: Der Vizepräsident der Abteilung Produkt- und Technologie-Kooperation bei Monsanto erhielt für seine bahnbrechenden Experimente zur genetischen Modifikation von Pflanzenzellen 1998 die US-amerikanische Nationalmedaille für Technologie. Hier äußert er sich zu Zukunftsperspektiven genmanipulierter Nutzpflanzen.

Wie sieht ein solcher Transfer aus?
Gerade läuft ein Kooperationsprojekt zur Übertragung von Virusresistenz-Genen auf Süßkartoffeln. Wir werden niemals ein Geschäftsinteresse an der Knolle haben, einfach weil sie auf dem Weltmarkt keine Rolle spielt. Trotzdem haben wir kenianischen Wissenschaftlern unser geistiges Eigentum und unser Know-how zur Verfügung gestellt; so gelang es ihnen, Süßkartoffeln gegen deren schlimmste Krankheiten in Afrika resistent zu machen, die zu Ernteeinbußen von bis zu 80 Prozent führen können.

Was geschieht im dritten Bereich?
Im mittleren, den ich einen „Übergangsmarkt" nenne, spielt die Biotechnologie noch keine so große Rolle. Auf lange Sicht verspreche ich mir davon aber wichtige Impulse, auch für die Entwicklungshilfe. Hier setzten wir bisher unsere älteren, nicht-biotechnologischen Produkte ein, wie etwa Mais-Hochertragshybdriden, und künftig werden wir wohl auch Biotech-Produkte einbeziehen. Wir laden die Kleinbauern zur Besichtigung eines Musterfeldes ein, und sie entscheiden dann, ob sie das Saatgut auf ihrem Land ausprobieren wollen. Sind sie danach zufrieden, können sie im Folgejahr noch einmal die gleiche oder eine noch größere Fläche so bestellen. Solche Programme laufen in Mexiko, Indien und Afrika. Im günstigsten Fall haben die Bauern nach einer drei- oder vierjährigen Experimentierphase so viel erwirtschaftet, dass sie praktisch selbstständig weiterarbeiten können.

Und wie profitiert Monsanto dabei?
Wir verkaufen Saatgut und Herbizide zu den üblichen Marktpreisen, aber wir

unterstützen auch die Ausbildung, die Testphasen und den Aufbau von Vertriebssystemen, sodass wir in den ersten paar Jahren eigentlich gar keinen Gewinn machen. Das beginnt erst, wenn das Projekt so gut läuft, dass es sich selber trägt. So weit sind wir bis jetzt aber noch bei keinem dieser Programme.



Kommen wir zu den ökologischen Auswirkungen der genmanipulierten Nutzpflanzen. Wo sehen Sie die wichtigsten Pluspunkte?
Als Erstes fällt den Leuten meist der geringere Verbrauch an Pestiziden ein, und bei der Bt-Baumwolle zum Beispiel, die ein Bakterienprotein als Insektizid herstellt, macht sich das gewaltig bemerkbar. Allein in den letzten vier Jahren sollen 1230 Tonnen Pestizide eingespart worden sein, und es werden noch viel, viel mehr, wenn man die biotechnologischen Möglichkeiten ausgiebiger nutzt.

Ein weiterer Vorteil sind aber die höheren Erträge. Unser heutiger Bt-Mais macht noch nicht sonderlich viele Insektizide überflüssig, aber er bringt merkliche Ertragssteigerungen – je nach Saison und Region 5 bis 15 Prozent.

Und was bringt das der Umwelt?
Im Endeffekt verringert sich dadurch der Verbrauch von Land, Wasser, Dünger und Pestiziden im Maisanbau. Mit dem auch bisher üblichen Ressourcen-Einsatz erzielt man eine 10 Prozent höhere Maisernte, nutzt die Ressourcen also besser. Mehr noch: Wenn ohnehin gutes Ackerland noch produktiver wird, dann kann man ärmere Böden brach liegen lassen und die Flächen der Natur überlassen, und das ist von großem Nutzen für die Umwelt. Wir können ja nicht ewig an unseren alten Anbaumethoden festhalten – mit all dem Chemikalieneinsatz, dem Wasserverbrauch, dem Urbarmachen von immer mehr Wildnis, der Landschaftszersiedelung und der Produktion von Industriemüll.

Die Biotechnologie versprach nicht nur mehr, sondern auch gesündere Nahrung mit besserem Nährwert. Statt dessen gibt es jetzt den Bt-Mais. Der legendäre „Goldreis“ mit höherem Carotin-Gehalt steckt noch in der ersten Testphase. Ist mit diesen nährwertverbesserten Lebensmitteln überhaupt je zu rechnen?
Überall zeigen sich Fortschritte, in der industriellen und akademischen Forschung, bei den öffentlich-staatlichen Einrichtungen. Zum Beispiel arbeiten wir zusammen mit dem nichtkommerziellen Tata Energy Research Institute in Indien an einem „goldenen“ Rapsöl, das genau wie der Goldreis besonders viel Beta-Carotin enthält, eine Vorstufe von Vitamin A. Das könnte in Regionen, wo Rapsöl zur täglichen Kost gehört, den Vitamin-A-Mangel mildern.

Die Nahrungsmittel der Industrieländer zu verbessern, ist kein vorrangiges Ziel von Monsanto, aber in anderen Unternehmen und an Universitäten wird intensiv daran gearbeitet. DuPont zum Beispiel hat ein besonders lange haltbares Öl mit einem höheren Oleinsäure-Anteil und einem geringeren Gehalt an mehrfach ungesättigten Fettsäuren entwickelt. Es wird auch an der Modifikation anderer Fettsäuren gearbeitet, um gesundheitlich wertvollere Speiseöle zu erhalten. Außerdem sind Forschungen zur Erhöhung des Vitamin-D-Gehalts von Sojaöl im Gange.

Ein oft vorgebrachter Einwand gegen Genfood betrifft das Risiko von Allergien. Kann die Biotechnologie auch umgekehrt das Risiko mildern?
Das Problem der Nahrungsmittelallergien ist natürlich Gegenstand verschiedener Projekte, auch bei Monsanto. Uns ist bereits gelungen, ein bekanntes Allergie auslösendes Protein auf genetischer Ebene an bestimmten Stellen zu verändern und damit sein allergenes Potenzial drastisch zu senken. Andere Forschergruppen wollen bestimmte natürliche Inhaltsstoffe von Erdnüssen, Sojabohnen und weiteren Produkten „entschärfen“, auf die ja viele Menschen allergisch reagieren.

Sicherlich ein Punkt, der manche mit der Gentechnik versöhnen mag. Hat das Unternehmen aus den Erfahrungen mit der öffentlichen Kritik gegen Gentechnik gelernt?
Monsanto bemüht sich jetzt, aufgeschlossener mit den Ängsten der Menschen hinsichtlich genmanipulierter Nahrungsmittel umzugehen. Wir haben gemerkt, dass man sich mit manchen Genmodifikationen auf besonders heikles Terrain begibt. Vegetarier zum Beispiel dürfte die Vorstellung beunruhigen, Gemüse mit einem tierischen Gen zu essen. Für Menschen bestimmter Kultur- oder Religionszugehörigkeit könnte es ähnliche Probleme geben. Deshalb haben wir uns entschlossen, auf tierische Gene in Nahrungspflanzen zu verzichten.

Ich glaube, es ist niemandem gedient – auch Monsanto nicht –, wenn man die potenziellen Gefahren der Biotechnologie ignoriert. Aber ich kann weder heute noch für die absehbare Zukunft erkennen, dass von unseren genveränderten Produkten, seien sie schon auf dem Markt oder noch in der Entwicklung, ein messbares Risiko ausgeht. Zu dem gleichen Schluss sind zahlreiche nationale und internationale wissenschaftliche Organisationen gekommen, einschließlich der Amerikanischen Ärztevereinigung, der Nationalen Akademie der Wissenschaften und der Weltgesundheitsorganisation.

Gibt es so etwas wie eine neue Firmenphilosophie?
Wir bei Monsanto haben uns kürzlich verpflichtet, mit allen betroffenen gesellschaftlichen Gruppierungen in einen intensiveren Dialog zu treten, unsere Arbeitsmethoden und sicherheitsrelevanten Erkenntnisse transparenter zu machen, kulturell und ethisch begründete Vorbehalte zu respektieren, unsere Technologie den Entwicklungsländern verfügbar zu machen und sicherzustellen, dass unsere Leistungen den Interessen der Verbraucher und des Umweltschutzes gerecht werden. Ich glaube, diese Neuorientierung und unser neuer selbst auferlegter Kodex werden sowohl dem Firmenimage als auch der Akzeptanz der neuen Technologien dienen. ▶

KONTRA

Braucht die Welt Genfood?

Interview mit Margaret Mellon

Spektrum der Wissenschaft: Waren Sie schon immer skeptisch gegenüber gentechnisch veränderten Nahrungsmitteln?

Dr. Margaret Mellon: Auf die Gentechnologie bin ich in den achtziger Jahren gestoßen, als ich am Institut für Umweltrecht an einem Projekt über giftige Chemikalien arbeitete. Anfangs hatte ich zur Biotechnologie eine positivere Einstellung als jetzt; wie viele andere Leute auch, war ich nicht sehr kritisch. Aber je mehr ich darüber lernte und je gründlicher ich nachfragte, desto weniger konnte ich die damit verknüpften übersteigerten Versprechungen für bare Münze nehmen.

Allerdings möchte ich auch betonen, dass die Union kritischer Wissenschaftler, deren Mitglied ich bin, kein Verein von Biotechnologie-Gegnern ist. Wir halten ihren Einsatz bei der Produktion von Medikamenten zum Beispiel für sehr sinnvoll. Der therapeutische Nutzen solcher neuartigen Arzneimittel übersteigt die Risiken, ganz abgesehen davon, dass es oft gar keine Alternativen gibt.

Verhält es sich bei der Landwirtschaft ganz anders?

Völlig anders. Bis jetzt zumindest sind mit den Biotech-Agrarprodukten nur bescheidene Vorteile verbunden, und ob diese schwerer wiegen als die Gefahren, muss sich erst noch erweisen. Außerdem gibt es für Probleme der Landwirtschaft bestechende Alternativlösungen, nur: Wir vernachlässigen sie schlichtweg.

Viele Forscher und politisch Sachverständige argumentieren aber, wir bräuchten die Biotechnologie unbedingt zur Ernährung der Weltbevölkerung – speziell in den Entwicklungsländern.

Damit sprechen Sie eine wichtige Frage an; etwa 800 Millionen Menschen sind unterernährt oder hungern. Aber: Bietet die Gentechnik dafür die beste oder die einzige Antwort? Wir haben heute schon genug Nahrung für alle, aber sie erreicht nicht die Menschen, die sie brauchen. Wer hungert, ist meistens schlicht zu arm, um die angebotenen Lebensmittel zu kaufen, und das, obwohl die Preise noch nie so niedrig waren wie heute. Das Problem liegt also bei den Einkommensunterschieden – was tut die Gentechnologie dagegen?

Das eigentlich Tragische ist, dass die Debatte um die Biotechnologie von einer echten Lösung des Hungerproblems in der Welt ablenkt. Ich würde es begrüßen, wenn man ernsthaft fragte: „Wie können wir den Hungernden der Welt helfen, sich selber zu ernähren?“ – und dann einen Katalog möglicher Antworten erstellte. Technische Verbesserungen, auch die Gentechnik, würden mit auf dieser Liste stehen, aber gewiss nicht an erster Stelle. Viel wichtiger sind Handelspolitik, Infrastruktur und Landreform, aber all dies findet momentan kaum Beachtung.

Gentechnik halten Sie also auch hier nicht für obsolet.

Durchaus nicht. Die Gentechnologie hat ihren festen Platz und steht nicht zur Disposition, aber ich halte sie nicht für das Allheilmittel gegen den Welthunger. Behandelt man sie als solches, gerät die ganze wichtige Debatte in Schieflage. Ich staune auch, wie schnell bei manchen Leuten die Vorzüge der traditionellen Züchtungsmethoden in Vergessenheit geraten sind – immerhin haben wir dieser Technik unsere Hochleistungs-Landwirtschaft zu verdanken.

Wie stehen Sie zu dem Argument, dass genmanipulierte Nutzpflanzen eine umweltverträglichere Landwirtschaft ermöglichen?

Was heißt umweltfreundlicher Landbau? Einer ohne Pestizide? Ich meine, dazu gehört eigentlich noch viel mehr. Betrachten wir aber einmal nur die angestrebte Minderung des Pestizid-Verbrauchs dank genmanipulierter Sorten. Umfragen des US-Landwirtschaftsministeriums unter amerikanischen Farmern zufolge hat der Anbau von schädlingsresistentem Bt-Mais als



TOM WOLFF

Dr. Margaret Mellon: Die studierte Juristin und promovierte Molekularbiologin ist Direktorin des Landwirtschafts- und Biotechnologieprogramms der Union kritischer Wissenschaftler in Washington. Sie erläutert ihre Vorbehalte gegen genmanipulierte Pflanzen, sieht Risiken für die menschliche Gesundheit und die Umwelt.

Maßnahme gegen den Maiszünsler nicht viel Spritzmittelersparnis gebracht, weil das Insekt auf den allermeisten Maisfeldern ohnehin nicht chemisch bekämpft werden muss.

Der Einführung der Bt-Baumwolle hingegen folgte ein deutlicher Rückgang des Pestizidverbrauchs. Das ist gut für die Umwelt und gut für die Pflanzer, die damit ihre Betriebskosten senken können. Dieser Nutzen währt aber nur so lange, wie das Bt-Merkmal greift. Ich glaube, die meisten Wissenschaftler rechnen damit, dass die Schädlinge bei der Art und Weise, wie die Bt-Pflanzen angebaut werden, eher früher als später Resistenzen entwickeln. Und damit wären dann die Vorteile der Bt-Baumwolle dahin. Wahrscheinlich werden wir mit ihr die gleiche Erfahrung machen wie schon zuvor mit allen Pestiziden – sie wirkten nur eine begrenzte Zeit lang. Dies ist also kein dauerhafter Weg zu einer umweltfreundlicheren Landwirtschaft.

Wie steht es mit ökologischen Risiken?
Inzwischen sind sich Fachleute weitgehend darüber einig, dass Gene aus den Biotech-Pflanzen auf verwandte Arten übergehen werden. Mit dem Pollen gelangen die neuen Gene ja auf benachbarte Felder oder in die freie Natur. In Kanada führt dieser Genfluss bereits zur Entstehung herbizidresistenter Unkräuter.

Sehen Sie sogar gesundheitliche Gefahren durch Genfood auf uns zukommen?
Ich wüsste keinen konkreten Grund, warum die derzeit schon gehandelten Lebensmittel dieser Art bedenklich sein sollten, aber vorbehaltloses Vertrauen kann ich dennoch nicht aufbringen. In der wissenschaftlichen Zeitschrift „Science“ teilte im letzten Juni ein Wissenschaftler mit, er habe die Fachliteratur nach Vergleichsstudien zwischen genmanipulierten und normalen Nutzpflanzen durchsucht und nur ungefähr fünf Arbeiten entdeckt, die in der üblichen Weise von Fachkollegen begutachtet, „peer-reviewed“, worden waren. Vom wissenschaftlichen Standpunkt aus ist das absolut keine Basis für die Behauptung, wir wüssten genug, um uns der Unbedenklichkeit dieser Nahrungsmittel sicher zu sein.

Was befürchten Sie konkret?
Bei so wenig Wissen würde ich an erster Stelle Bedenken wegen Allergie-Risiken anmelden und zweitens wegen der Gefahr neuer Toxine in der Nahrung. Natürlich wird die Pflanzenzüchtung dem entgegenzusteuern versuchen, aber Pflanzen enthalten nun einmal eine Vielzahl von Giftstoffen. Wenn Wissenschaftler nun an Systemen herumhantieren, die niemand vollständig durchschaut, dann kann es durchaus zu unerwarteten Effekten kommen, wie etwa dem Anschalten von Toxin-Genen. In der traditionellen Züchtung unterliegt die Zusammenführung und Verteilung von Genen bestimmten Regeln; danach richtet man sich hier nicht.



Sie sehen die Genmanipulation von Nutzpflanzen also nicht als Fortsetzung der traditionellen Züchtung mit anderen Methoden?
Nein, auf keinen Fall. Eine Kreuzung zwischen Elefant und Maispflanze ist züchterisch ein Ding der Unmöglichkeit, nur die Forscher schaffen solche in der Natur nicht vorkommenden Genkombinationen.

Vom wissenschaftlichen Standpunkt aus wird hier fraglos etwas grundsätzlich anderes gemacht als bisher, und zwar etwas Unnatürliches. Das bedeutet freilich nicht, dass sich dies *zwangsläufig* als besonders gefährlich erweisen muss, aber der Bruch mit den herkömmlichen Verfahrensweisen ist doch so groß, dass besondere Vorsicht angebracht ist.

Und wo speziell?
Eben dort, wo diese Technologie in unsere Lebensmittel eingreift. Unzählige Menschen – praktisch die gesamte Bevölkerung – könnten mit der genmanipulierten Nahrung in Kontakt kommen, und wir haben gerade einmal eine Hand voll begutachteter Arbeiten, die sich mit den Sicherheitsaspekten befassen. Die Frage ist doch: Gehen wir unter der Voraussetzung, es handle sich nur um eine kleine Erweiterung traditionellen Züchtens, von der *Annahme* aus, diese Technologie sei sicher – oder haben wir *Beweise* dafür? Als Wissenschaftlerin möchte ich Beweise sehen. Warum sich mit Annahmen zufrieden geben, wenn man die Fragen im Labor klären kann?

Nun lässt sich ja wissenschaftlich nie beweisen, dass eine Technologie hundertprozentig sicher ist. Wären Sie einverstanden, wenn ein „Gen-Lebensmittel“ hinreichend getestet würde? Und wie viel Restrisiko erscheint Ihnen tragbar?
Mit einer adäquaten Prüfung könnte ich leben. Nur stellt sich diese Frage jetzt noch gar nicht. Niemand kann sagen: „Bitte sehr, wir haben soundso viele von Fachkollegen begutachtete experimentelle Studien, in denen genmanipulierte mit nicht manipulierten Nahrungsmitteln nach vielen Kriterien verglichen wurden, und alle besagen, dass Genfood unbedenklich ist.“

Erst wenn wir Beweismaterial in dieser Größenordnung haben, *dann* werden wir darüber reden, ob es genügt. Und wenn alles gut geht, werden wir schließlich an den Punkt kommen, wo wir sagen können, wir waren vorsichtig, aber nun legen wir los – jetzt oder nie. Dieser Punkt ist aber nicht in Sicht.

Manche mögen entgegnen, niemand lebt ohne Risiko.
Natürlich setzen wir uns ständig irgendwelchen Risiken aus, aber wir sollten es nicht ohne Grund tun. Würden wir in den reichen Nationen nicht im Nahrungsüberfluss leben, würden sich die Regale hier nicht schon unter 300 000 Lebensmittelprodukten biegen, dann hätte die Gesellschaft dort einen Grund, auch das Risiko gentechnisch veränderter Nahrungsmittel einzugehen. Aber wir haben reichlich zu essen, genau genommen sogar zu viel. Mit unserem System der Ernährung gibt es zwar viele Probleme, aber die wird die Biotechnologie nicht lösen. ■

*Die beiden Interviews führte **Sasha Nemecek**, Wissenschaftsjournalistin in New York.*

Literaturhinweise

Bio- und Gentechnologie. Anwendungsfelder und wirtschaftliche Perspektiven. Von G. Kaiser et al. Campus, 1997.

Adequacy of Methods for Testing the Safety of Genetically Modified Foods. Von H. A. Kuiper et al. in Lancet, Bd. 354, Nr. 9187, S. 1315, 1999.

*Schreiben Sie uns Ihre Meinung zum Thema Genfood in unserer Online-Diskussion bei **www.spektrum.de***



Als erste Europäer machten die Kreuzritter Bekanntschaft mit den muslimischen Damaszenerschwertern. Dieser Holzstich von Gustav Doré (1832–1883) zeigt in romantischer Verklärung die Begegnung von Richard Löwenherz mit dem Sultan Saladin in der Schlacht bei Arsuf am 7. September 1191.

Wunder der Schmiedekunst
Damaszenerklingen

Orientalische Schmiede schufen einst Stahlklingen von unübertroffener Güte. Das Abendland kam nie hinter das Geheimnis ihrer Kunst. Der Autor und ein Schmied haben es nun gelüftet.

Von John D. Verhoeven

Von der Bronzezeit bis ins 19. Jahrhundert dienten Schwerter als Waffen. Ihre Qualität konnte über den Ausgang einer Schlacht entscheiden. Heere mit Damaszenerschwertern, denen die abendländischen Ritter zuerst bei den Kreuzzügen begegneten, hatten waffentechnisch einen klaren Vorteil.

Damaszenerklingen wurden ursprünglich in Damaskus – daher ihr Name – und später auch andernorts im islamischen Orient hergestellt. Sie zeichneten sich durch zwei Eigenschaften vor europäischen Schwertern aus. Ihre Oberfläche zierte ein wellenförmiges Muster, das heute unter dem Namen Damast bekannt ist (siehe Bild auf Seite 66). Aber was noch wichtiger ist: Die Schneide war unglaublich scharf. Angeblich konnten Damaszenerschwerter in der Luft schwebende seidene Taschentücher zerteilen, wozu ihre europäischen Gegenstücke niemals fähig gewesen wären. Dies verschaffte ihnen einen legendären Ruf.

Trotz vieler Bemühungen kam das Abendland nie hinter das Geheimnis der Herstellung dieses Stahls, der für Schwerter, Dolche, Äxte und Speerspitzen verwendet wurde. Auch die besten europäischen Metallurgen und Klingenschmiede vermochten ihn nicht zu kopieren, selbst nachdem sie sich Muster besorgt und sie eingehend untersucht hatten. Im Ursprungsland ging die Kenntnis seiner Herstellung gleichfalls verloren; nach gängiger Expertenmeinung stammen die letzten Damaszenerschwerter hoher Qualität aus dem frühen 19. Jahrhundert. Nun aber gelang es einem begabten Schmied und mir, das Geheimnis dieses Stahls zu lüften.

Natürlich stehen wir mit diesem Anspruch nicht allein, aber wir konnten als Erste den Beweis dafür erbringen, indem wir originalgetreue Kopien der kostbaren Waffen anfertigten. Damit eine Theorie über die Herstellung von Damaszenerklingen und -dolchen glaubhaft ist, müssen die Replikate aus den gleichen Ausgangsmaterialien wie die Originale gemacht werden. Außerdem sollten die fertigen Waffen das gleiche Damastmuster aufweisen und dieselbe chemische und mikroskopische Struktur haben.

Ausgangsmaterial für echte Damaszenerklingen waren kleine, aus Indien

importierte Stahlblöcke. Sie hatten die Form von Hockey-Pucks mit rund zehn Zentimetern Durchmesser und knapp fünf Zentimetern Höhe. Seit etwa 1800 sind sie unter dem Namen Wootz-Barren oder Wootz-Kuchen bekannt. Außer Eisen enthalten sie rund 1,5 Gewichtsprozent Kohlenstoff, dazu geringe Mengen anderer Verunreinigungen wie Silizium, Mangan, Phosphor und Schwefel. Wie englische Reisende schon früh aus Indien berichteten, wurden die Damaszenerklingen mit ihrem charakteristischen Damastmuster aus solchen Wootz-Kuchen durch wiederholtes Erhitzen und Hämmern direkt hergestellt.

Das Damastmuster lässt sich auch anders erzeugen. Kunstschmiede können Schichten mit hohem und niedrigem Kohlenstoffgehalt abwechselnd zu einem komplizierten Verbundwerkstoff zusammenfügen. Dieses Hammer- oder Musterschweißen hat im Westen eine lange Tradition, die bis ins alte Rom zurückgeht. Ähnliche Techniken finden sich auch in Indonesien und Japan. Das resultierende Gefüge ist jedoch völlig anders als bei „Wootz“-Klingen, um die es in diesem Artikel ausschließlich gehen soll.

Schon 1824 verkündete Jean Robert Bréant in Frankreich, er hätte das Geheimnis der muslimischen Klingenschmiede gelüftet. Wenig später erhob der Russe Pavel Anosoff denselben Anspruch. Im 20. Jahrhundert gab es ähnliche Behauptungen – zuletzt von Oleg D. Sherby und Jeffrey Wadsworth (siehe „Damascus Steels“, Scientific American, Februar 1985). Aber in keinem Fall ließen sich mit den vorgeschlagenen Methoden Schwerter herstellen, die in Aussehen wie Gefüge den alten Originalen in zufriedenstellendem Maße gleichen.

Den Versuchen, die alten Wootz-Klingen nachzuahmen, stand lange Zeit ein gravierendes Hindernis entgegen. Damaszenerwaffen von Museumsqualität sind wertvolle Kunstgegenstände und werden ungern der Wissenschaft zum Studium ihres Gefüges geopfert. 1924 übergab jedoch ein berühmter europäischer Sammler, Henri Moser, vier Schwerter an den Schweizer Materialforscher B. Zschokke, der sie zur chemischen Analyse und Prüfung der Mikrostruktur zerschnitt. Die restlichen Stücke gingen an das Bernische Historische Museum (Sammlung Moser Charlottenfels), das mir kürzlich einige für Studienzwecke überließ.

Als ich die kostbaren Exemplare untersuchte, fand ich darin rundliche Teilchen aus Eisencarbid (Fe_3C), das auch unter dem Namen Zementit bekannt ist. Sie haben im Allgemeinen einen Durchmesser von sechs bis neun Mikrometern und sind zu Bändern oder Lamellen mit Abständen von 30 bis 70 Mikrometern angeordnet, die parallel zur Klingenoberfläche verlaufen.

Beim Ätzen der Klingen erscheinen die Carbidbereiche als weiße Linien in der dunklen Stahlmasse. Ähnlich wie die gewellten Wachstumsringe eines Baums die Maserung von Holzbrettern verursachen, rufen Wellen in den Carbidbändern …ie komplexen Linienmuster …f den Klingenoberflächen …ervor. Die Carbidteilchen sind extrem hart, und man vermutet, dass die Schichten starren Zementits in einer weicheren Grundmasse von elastischem Stahl den Damaszenerwaffen die günstige Kombination aus harter Schneide und einer federnden Biegsamkeit verleihen.

Dieser prachtvolle Dolch mit Damaszenerstahlklinge stammt aus Mughal in Indien und wurde um 1585 hergestellt. Er ist an der Spitze verdickt, damit er auch Rüstungen durchdringen kann. Smaragde und Rubine zieren das goldene Heft.

Meine ersten Versuche, die Mikrostruktur von Wootz-Klingen nachzuahmen, unternahm ich in einem normalen Universitätslabor. Bald merkte ich jedoch, dass ich Hilfe von einem Praktiker mit Erfahrung in der Kunst des Schmiedens scharfer Waffen brauchte. Alfred H. Pendray erwies sich als dieser Mann. Er hatte sich unabhängig von mir mit dem Rätsel der Damaszenerklingen beschäftigt und aus kleinen Stahlbarren, die er in einem gasbetriebenen Ofen herstellte, Klingen geschmiedet, deren Mikrostrukturen denjenigen der hochwertigen Vorbilder oft erstaunlich nahe kamen.

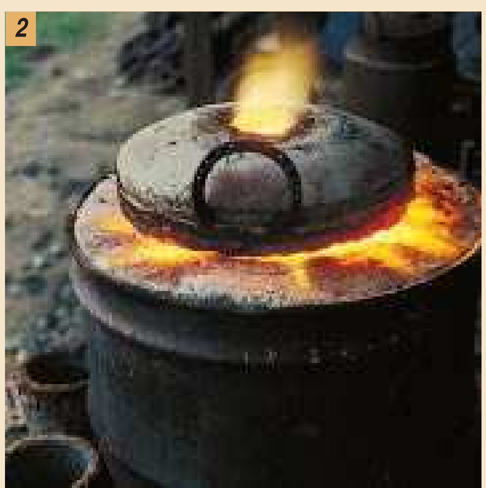
Pendray lernte das Hufschmiedehandwerk in jungen Jahren von seinem Vater und entwickelte mit zähem, geduldigem Fleiß ein tiefes Verständnis der Kunst des Stahlschmiedens. Meine Zusammenarbeit mit ihm begann 1988. Zunächst erwies es sich als schwierig, meine theoretischen Vorstellungen mit seinen praktischen Erfahrungen in Einklang zu bringen. Daher fuhr ich 1993 mit einem meiner Studenten an der Iowa State University in Ames zu Pendrays Schmiede in der Nähe von Gainesville (Florida); dort installierten wir ein Thermoelement und ein Infrarot-Strahlungsthermometer – beides computergesteuert –, um die Temperaturen bei den verschiedenen Schmelz- und Schmiedeprozessen aufzunehmen.

Zuerst versuchten wir, nach der von Wadsworth und Sherby beschriebenen Methode Klingen herzustellen; aber entweder erhielten wir nicht die richtige Mikrostruktur oder keine Damastmuster auf der Oberfläche. Daraufhin arbeiteten wir über mehrere Jahre hinweg ein neues Verfahren aus. Mit ihm kann Pendray nun routinemäßig Wootz-Damaszenerstahlklingen reproduzieren. Dabei gelingt ihm sogar das Muster, das einige der prächtigsten alten muslimischen Klingen ziert und als Mohammeds Leiter bekannt ist (siehe Bild auf Seite 65). Die Wellenlinien entlang der Klinge ordnen sich darin zu Sprossen an, auf denen die ▶

Wie man eine Damaszenerklinge schmiedet



1 Man gebe hochreines Eisen, Sorel-Eisen, Holzkohle, Glasscherben, grüne Blätter und weitere Ingredienzien in den Schmelztiegel. Das Mengenverhältnis von Eisen, Sorel-Eisen und Holzkohle in der Mischung bestimmt den Anteil an Kohlenstoff und Fremdelementen, die schließlich im Stahlbarren enthalten sind.



2 Man erhitze den Tiegel, bis das Eisen schmilzt. Dabei bildet das Glas Schlacke, die den Barren vor Oxidation schützt. Die Blätter halten das Glas zunächst oben auf der Charge. Danach erzeugen sie Wasserstoff, der die Aufkohlung von Eisen beschleunigt. Dabei steigt der Kohlenstoffgehalt des Stahls auf 1,5 Prozent. Ohne Blätter und Glas steigt das Risiko, dass der Barren beim Hämmern bricht.



3 Man lasse den Tiegel abkühlen und entnehme den Barren. Er ähnelt den „Wootz-Kuchen“, wie sie die alten orientalischen Schmiede verwendeten.



6 Man schneide aus dem flach gehämmerten Barren die gewünschte Klingenform aus und schmiede von Hand die feineren Details.



7 Man schleife überschüssigen Stahl und die entkohlte, oxidierte Oberflächenschicht ab. Pendray benutzt dafür eine Riemenschleifmaschine.



8 Nach Wunsch schneide man in die Klinge Kerben und bohre Löcher, um Mohammeds Leiter beziehungsweise das Rosenmuster zu erzeugen. Die Klinge wird danach wieder flach geschmiedet und die Oberfläche poliert.

Gläubigen symbolisch zum Himmel aufsteigen können.

Unser Verfahren ähnelt der Methode, wie sie von früheren Forschern beschrieben wurde – mit einigen wichtigen Unterschieden. Wir erzeugen einen kleinen Stahlbarren einer bestimmten Zusammensetzung in einem geschlossenen Schmelztiegel, der anschließend in Klingenform geschmiedet wird. Der Erfolg hängt dabei von drei Faktoren ab:

- der Mischung von Eisen, Kohlenstoff und anderen Elementen (wie Vanadium und Molybdän, hier kurz Fremdelemente genannt) im Stahl,
- der Hitze des Schmelztiegels und der Dauer der Befeuerung,
- der Temperatur und dem handwerklichen Geschick bei den wiederholten Schmiedevorgängen.

Schon lange hatten wir den Verdacht, dass Fremdelemente eine Schlüsselrolle bei der Lamellenbildung spielen; wir wussten nur nicht, welche. Silizium, Schwefel und Phosphor, wohlbekannte Bestandteile von Wootz-Stählen, ließen sich rasch ausscheiden. Aber welche anderen Elemente kamen in Frage?

Zum Durchbruch verhalf uns ein glücklicher Zufall: Wir probierten unter anderem Sorel-Metall als Komponente für den Barren aus. Dabei handelt es sich um eine hochreine Eisen-Kohlenstoff-

Der Meisterklingenschmied Alfred H. Pendray veranstaltet eine Vorführung in seiner Werkstatt bei Gainesville (Florida).



4 Man erhitze den Barren auf knapp unter 700 Grad Celsius. Pendray verwendet einen Gasofen, bei dem das Propan-Luft-Verhältnis so eingestellt ist, dass die Verzunderung – die Bildung eines Oxid-Überzugs – beim Schmieden möglichst gering bleibt. Der Überzug ist dann typischerweise einen halben Millimeter dick und muss am Ende abgeschliffen werden.



5 Man schmiede den Barren, indem man ihn durch Hammerschläge zu verformen sucht, solange er noch heiß ist. Wird er zu kalt, um ohne Brüche schmiedbar zu sein, heize man ihn wieder auf und bearbeite ihn dann erneut. Hier sieht man vier Stadien des Barrens; zwischen jedem liegen mehrere Zyklen von Erwärmen und Schmieden. Insgesamt können fünfzig solcher Zyklen nötig sein, um den Barren in Klingenform zu bringen – ein höchst arbeitsintensiver Vorgang. Pendray benutzt einen Drucklufthammer. Hämmern mit der Hand dauert noch länger.



9 Man ätze die Klingenoberfläche mit einer Säure an, um das Muster sichtbar zu machen. Dabei färbt sich das weichere Eisen dunkler, und das härtere Eisencarbid bildet dazwischen helle Linien.

Die fertige Klinge zeigt Mohammeds Leiter und das Rosenmuster.

ALLE FOTOS: WILLIAM ROSENTHAL

Legierung mit etwa 3,9 bis 4,7 Prozent Kohlenstoff, die aus dem großen Bergwerk Lac Tio am Sankt-Lorenz-Strom in Quebec (Kanada) stammt. Das Erz dieser Lagerstätte enthält Spuren von Vanadium, weshalb auch das daraus hergestellte Sorel-Metall mit 0,003 bis 0,014 Prozent des Elements behaftet ist. Anfänglich achteten wir nicht auf diese Beimischung; denn wir hielten sie für zu gering, um einen Einfluss zu haben. Nachdem wir jedoch zwei Jahre auf der Stelle getreten waren, mussten wir unsere Ansicht revidieren. Offenbar konnten auch winzige Verunreinigungen eine entscheidende Rolle spielen.

Das zeigten Experimente mit Stahl, der etwa 1,5 Prozent Kohlenstoff und nur rund 0,003 Prozent Vanadium enthielt. Wenn wir diese Legierung fünf- oder sechsmal auf ein bestimmtes Temperaturniveau erhitzten und auf Raumtemperatur abkühlen ließen, entstanden genau die Bänder aus Carbidpartikeln, die beim Schmieden die charakteristischen Oberflächenmuster produzieren. Molybdän hat denselben Effekt – in geringerem Ausmaß gilt das auch für Chrom, Niob und Mangan. Andere Elemente wie Kupfer und Nickel fördern die Carbidbildung dagegen nicht.

Um die Rolle der Verunreinigungen zu ergründen, untersuchten wir alte und neue ▶

Dieses Schwert aus Damaszenerstahl zeigt das klassische Damastmuster aus gewellten hellen und dunklen Linien. Laut Inschrift hat Assad Allah, der bekannteste persische Waffenschmied seiner Zeit, die Klinge 1691 oder 1692 angefertigt.

Klingen mit der Elektronenstrahlmikroanalyse. Dabei zeigte sich, dass Fremdelemente wie Vanadium, die in den Barren nur 0,02 Prozent oder weniger ausmachen, an bestimmten Stellen angereichert sind. Offenbar sondern sie sich auf mikroskopischer Ebene aus dem Eisen ab, während der flüssige Stahl erkaltet und fest wird.

Wie kommt es zu dieser Mikrosegregation? Stahl mit 1,5 Prozent Kohlenstoff kristallisiert aus der Schmelze in einer Form (Modifikation), die Austenit genannt wird. Beim langsamen Abkühlen und Erstarren schiebt sich dabei eine Front von kristallisiertem Austenit in die Flüssigkeit hinein; sie ist keine ebene Fläche, sondern gleicht einem Wald aus kleinen Tannenbäumen – wissenschaftlich Dendriten genannt (nach griechisch *dendron*, Baum). Austenit kann weniger Atome von Kohlenstoff und anderen Verunreinigungselementen aufnehmen als flüssiges Eisen; daher reichern sich beim allmählichen Erstarren des Metalls in Form von wachsenden Dendriten die Kohlenstoff- und Fremdatome in der verbleibenden Flüssigkeit an. In den Regionen zwischen den Tannenbaum-Ästen, die als Letzte erstarren, kann ihre Konzentration daher recht hoch werden (Kasten rechts).

Während die dicht nebeneinander aufgereihten Dendriten immer weiter in die Schmelze vordringen, sammeln sich an der Grenze zwischen ihnen also die Fremdatome in einer Reihe von erstarrten Tröpfchen, ähnlich einer Perlenkette. Beim mehrfachen Erhitzen und Abkühlen des Barrens bilden diese Anreicherungen dann offenbar die Keimzellen für das schnurartige Wachstum von harten Zementitpartikeln, die für die helleren Lamellen im Stahl sorgen.

Dafür gibt es einen überzeugenden Anhaltspunkt. Der Abstand zwischen den Spitzen der Dendriten beträgt etwa einen halben Millimeter, und er verringert sich, wenn der Barren beim Schmieden gestaucht wird. Der derart verkleinerte Abstand entspricht ziemlich genau dem zwischen den Lamellen im Damaszenerstahl.

Entscheidend sind winzige Verunreinigungen im Stahl

Der zweite entscheidende Faktor ist die richtige Temperatur beim Schmieden. Nur so erhält man die gewünschte Mischung von Austenit- und Zementitpartikeln. Die niedrigste Temperatur, oberhalb welcher der gesamte Stahl als Austenit vorliegt, heißt A-Temperatur. Bei Stählen mit mehr als 0,77 Prozent Kohlenstoff spricht man speziell von A_{cm}-Temperatur. Wird sie unterschritten, erscheinen im austenitischen Stahl mit der Zeit in zufälliger Verteilung Zementitteilchen, wie ich sie in den Klingen von Moser sah.

Die Entstehung der charakteristischen Lamellen war eines der größten Geheimnisse der Damaszenerklingen: Wieso ordnen sich die Carbidteilchen in Bändern an, wenn man die Stahlbarren schmiedet? Um das Rätsel zu lösen, untersuchten wir systematisch Querschnitte der Pucks auf ihrem Weg zur fertigen Klinge. Dazu erhitzten wir sie dicht unter die A_{cm}-Temperatur und hämmerten sie anschließend. Dabei kühlte sich der Barren um etwa 200 Grad ab, und der Anteil an Zementitteilchen stieg entsprechend. Wir wiederholten diesen Zyklus von Erhitzen und anschließendem Hämmern mit Abkühlen mehrfach. Wie wir feststellten, waren etwa fünfzig solcher Schmiedevorgänge erforderlich, um den Barren auf eine Breite von 45 und eine Dicke von fünf Millimetern zu bringen, was den Maßen einer Klinge in Originalgröße entspricht.

Die Entstehung der Lamellen stellen wir uns folgendermaßen vor. Während der ersten Zyklen – bis etwa zum zwanzigsten – bilden sich die harten Carbidteilchen mehr oder weniger zufällig. Aber mit jedem zusätzlichen Zyklus haben sie die Tendenz, sich an den Grenzen zwischen den Dendriten anzuordnen. Woran liegt das? Beim Erhitzen des Stahls lösen sich immer ein paar Carbidteilchen auf. Die Atome der Fremdelemente hemmen diesen Vorgang, sodass in ihrer Umgebung größere Zementitpartikeln zurückbleiben. Bei jedem Zyklus wachsen diese Teilchen – aber sie tun das nur langsam, weshalb zur Ausprägung der Lamellen viele Zyklen nötig sind. Weil sich die Fremdelemente in den Bereichen zwischen den Dendriten anreichern, konzentrieren sich die Carbidteilchen ebenfalls dort.

Unserer Theorie zufolge verursacht also die Absonderung der Verunreinigungselemente die Mikrosegregation der Zementitpartikeln und damit die Lamellenbildung. Um das zu beweisen, zeigten wir zunächst, dass die Lamellen verschwinden, wenn die Mikrosegration der Carbidteilchen unterbunden wird. Dazu nahmen wir kleine Stücke von alten und modernen Klingen mit guter Lamellenstruktur und erhitzten sie auf etwa 50 Grad Celsius über die A_{cm}-Temperatur. Dabei lösten sich alle Carbidteilchen im Austenitstahl. Dann schreckten wir die Klingen in Wasser ab. Als Resultat der schnellen Abkühlung erhielten wir die so genannte Martensit-Phase von Stahl. Sie ist sehr hart und fest und enthält keine Carbidteilchen. Mit diesen waren aber auch die Lamellen verschwunden.

Um die Zementitpartikeln wiederzugewinnen, erhitzten wir die Klingen mehrfach bis 50 Grad unterhalb der A_{cm}-Temperatur und ließen sie anschließend langsam an der Luft abkühlen. Dies gab den Zementitkristallen Zeit zu Wachstum und Segregation. Schon nach dem ersten Erwärmungs-Abkühlungs-Zyklus erschie-

Literaturhinweise

Archaeotechnology: The Key Role of Impurities in Ancient Damascus Steel Blades. Von J. D. Verhoeven, A. H. Pendray und W. E. Dauksch in: JOM: A Publication of the Minerals, Metals and Materials Society, Bd. 50, Nr. 9, S. 58, 1998.

On Damascus Steel. Von Leo S. Figiel. Atlantis Arts Press, 1991.

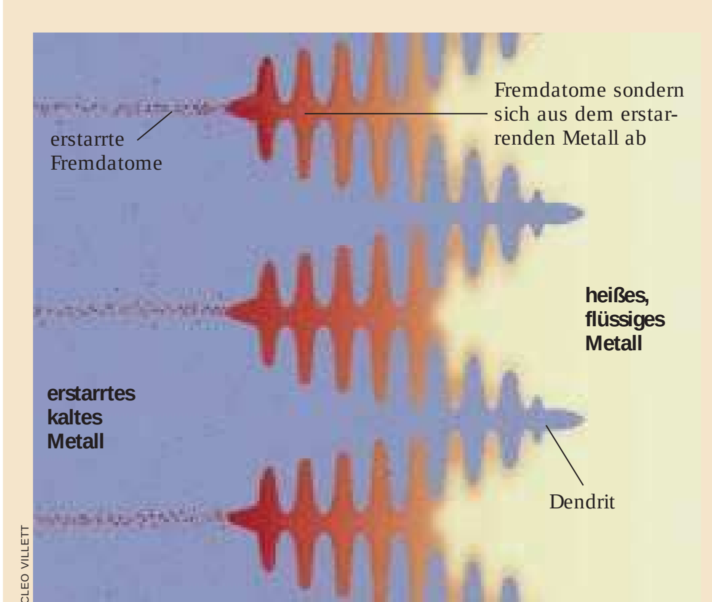
Damascus Steels. Von Oleg D. Sherby und Jeffrey Wadsworth in: Scientific American, 2/85, S. 94.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

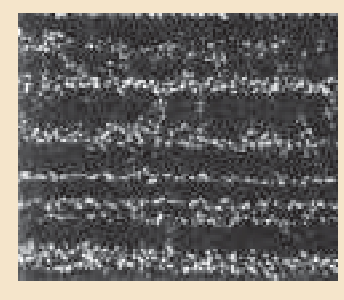
Wie das Damastmuster entsteht

Wenn verflüssigter Damaszenerstahl erstarrt, schiebt sich auf der mikroskopischen Ebene eine Front von kristallisierendem Metall in die Schmelze hinein. Sie ist nicht glatt, sondern hat die Form von aneinander gereihten „Tannenbäumen“, so genannten Dendriten.

Elemente wie Vanadium, die als Verunreinigungen vorhanden sind, passen schlecht in das Kristallgitter des erstarrenden Stahls und reichern sich daher in der Restschmelze zwischen den Dendriten an. Sobald sich auch diese verfestigt, sondern sich die Fremdatome in tropfenartigen „Perlen“ ab, die wie auf einer Schnur aneinander gereiht sind. Wird der Stahl beim nachfolgenden Schmieden immer wieder erhitzt und langsam abgekühlt, bilden die Verunreinigungen die Keime für das Wachstum von harten Eisencarbidteilchen, welche die hell gefärbten Lamellen in der Damaszenerklinge erzeugen.



CLEO VILLETT





HAL SAILSBURY

Die Mikrofotografie rechts oben zeigt eine Serie von hellen und dunklen Streifen in einem Querschnitt durch ein echtes Damaszenerschwert. Das Muster gleicht dem einer Reproduktion durch den Autor, das auf der Fotografie rechts unten zu sehen ist. Demzufolge dürfte das moderne Verfahren den alten, in Vergessenheit geratenen Herstellungsprozess exakt reproduzieren.

nen die Carbidteilchen wieder. Zwar waren sie zunächst noch zufällig verteilt, aber nach einem oder zwei zusätzlichen Zyklen begannen sie sich bereits wieder in Schichten anzuordnen, die nach sechs bis acht Zyklen deutlich ausgeprägt waren.

In einem anderen Versuch erhöhten wir die Temperatur weit über den A_{cm}-Punkt bis auf 1200 Grad Celsius, also knapp unter dem Schmelzpunkt von Stahl, und behielten sie 18 Stunden lang bei. Danach schreckten wir die Probe wiederum mit Wasser ab. Diesen Stahl konnten wir anschließend so vielen thermischen Zyklen unterwerfen, wie wir wollten: Die Zementitbänder kamen nicht wieder. Wie Rechnungen bestätigten, hatten sich bei dieser Hochtemperaturbehandlung die Fremdelemente durch Diffusion gleichmäßig im Stahl verteilt, und das anschließende Abschrecken gab ihnen keine Gelegenheit, sich erneut abzusondern.

Schließlich führten Pendray und ich auch sorgfältig kontrollierte Experimente mit Barren ganz ohne Fremdelemente durch. Noch so viele Erwärmungs-Abkühlungs-Zyklen erzeugten bei diesen Proben keine Ansammlungen von Carbidteilchen oder gar Lamellen. Diese erschienen erst nach Zugabe der Fremdelemente und der üblichen Behandlung.

Höhepunkt unserer Nachschöpfung der Damaszenerklinge war die Beantwortung einer weiteren Frage: Wie entsteht das berühmte Muster von Mohammeds Leiter? Hier stützen unsere Untersuchungen eine frühere Theorie, wonach die islamischen Schmiede die Sprossen durch Einkerbungen hervorbrachten. Nachdem wir die Klinge fast bis zur endgültigen Dicke geschmiedet hatten, ritzten wir quer dazu kleine Rillen ein. Danach schmiedeten wir den Stahl weiter, um die Furchen aufzufüllen. Dabei verringert sich besonders an den Kanten der Rillen der Abstand zwischen den hellen und dunklen Linien auf der Oberfläche. Indem wir zwischen den Einkerbungen zusätzlich flache Löcher in die Klinge bohrten, konnten wir auch eine Rosette zwischen den Sprossen erzeugen, die sich auf älteren Krummsäbeln findet und als Rosenmuster bekannt ist.

Warum ging das Wissen um die Herstellung des Damaszenerstahls vor etwa zwei Jahrhunderten verloren? Vielleicht enthielten nicht alle indischen Eisenerze die zur Bildung von Carbid-Lamellen notwendigen Fremdelemente. Die vier Klingen aus der Sammlung Moser waren durchweg mit Spuren von Vanadium „verunreinigt“. Möglicherweise wurde für die Stahlbarren aus Indien jedoch irgendwann ein anderes Eisenerz verwendet, sodass ihnen die nötigen Fremdelemente fehlten.

Dann konnten die orientalischen Schmiede und ihre Söhne auf einmal keine Klingen mit diesen wunderbaren Mustern mehr herstellen, und sie wussten wahrscheinlich nicht einmal warum. Dauerte dieser Zustand an, so lässt sich leicht vorstellen, dass nach einer oder zwei Generationen das Geheimnis der legendären Damaszenerschwerter verloren ging. Erst jetzt wurde dank einer Partnerschaft zwischen Wissenschaft und Handwerk die alte Kunst wieder entdeckt.



John D. Verhoeven ist emeritierter Professor für Werkstoff- und Ingenieurwissenschaften an der Iowa State University in Ames. Das Geheimnis der Wootz-Damaszenerklingen faszinierte ihn seit seiner Studienzeit an der Universität von Michigan in Ann Arbor. 1982 begann er an der Reproduktion von Damaszenerstahl zu arbeiten. Aus dem Vorhaben, das er anfangs eher als Liebhaberei betrieb, entwickelte sich durch die jahrelange Zusammenarbeit mit dem Schmied Alfred H. Pendray ein ernsthaftes Forschungsprojekt.

Neue Chancen bei Antibiotika-Resistenz

Krankheitserreger lernen, Antibiotika auszutricksen. Manche von ihnen besiegen bereits sämtliche gegen sie verfügbaren Waffen. Doch Biochemiker beginnen diese Strategien der Bakterien zu verstehen – und begegnen ihnen mit maßgeschneiderten Medikamenten.

Von K. C. Nicolaou und Christopher N. C. Boddy

Schon Alexander Fleming, der Entdecker des Penizillins, hatte gewarnt: Krankheitskeime können gegen Antibiotika unempfindlich werden! In den letzten Jahren nun häufen sich tatsächlich alarmierende Meldungen über pathogene Bakterienstämme, die sich durch die bewährten Medikamente nicht mehr bekämpfen lassen.

Anfangs erschienen Antibiotika als Wunderwaffe. Viele bakterielle Infektionskrankheiten, von Lungen- und Hirnhautentzündung bis zu Tuberkulose und Syphilis, verloren vor gut fünfzig Jahren ihre Schrecken. Doch schon bald begannen einzelne Mikroben, diese neuen Waffen der Medizin zu übertrumpfen.

Unter den über hundertfünfzig heute therapeutisch einsetzbaren Antibiotika ist kaum noch eines, gegen das einzelne mutierte Erregerstämme nicht schon Resistenzen entwickelt hätten. Dabei müssen sie den Schutzmechanismus nicht einmal in jedem Fall selbst erfinden. Denn Bakterien können solche genetischen Anleitungen auch von anderen Keimen übernehmen, zum Beispiel von harmlosen Darmbewohnern.

Durch sein eigenes Verschulden, durch falschen wie übermäßigen Einsatz von Antibiotika züchtet der Mensch regelrechte „Super-Stämme“ von pathogenen Mikroben heran, die sich vielseitig wehren, also gegen mehrere Antibiotika resistent sind. Bald wird eine Behandlung zu früh abgebrochen, bald werden Antibiotika bei Infektionen verabreicht, gegen die sie in Wirklichkeit machtlos sind. Das betrifft insbesondere Viruserkrankungen. Nach Meinung von Experten sind ein Drittel bis die Hälfte der ärztlichen Verschreibungen dieser Medikamente unnötig. Ebenso anfechtbar ist der hohe Antibiotika-Verbrauch für Nutztiere. In den USA wandern über zwei Drittel der jährlichen Produktion in die Tierhaltung, ein Großteil davon als Masthilfe. Auch in Seifen und Geschirrspülmitteln haben Antibiotika nichts zu suchen. All diese Übertreibungen bewirken nur, dass die mit den Medikamenten angreifbaren Keime verschwinden und sich stattdessen wehrhafte Varianten durchsetzen.

Aber selbst ohne so viel Missbrauch wird jedes Antibiotikum irgendwann „veralten“. Denn Bakterien sind von Natur aus Überlebenskünstler. Mit ihrer rasanten Vermehrung – viele teilen sich alle paar Stunden – und einigen anderen Eigenschaften, die genetische Veränderungen begünstigen, gelingt es ihnen immer wieder, sich schnell an widrige Verhältnisse anzupassen. Auch zukünftig ist also mit neuen hartnäckigen Formen von Pathogenen zu rechnen. Uns bleibt daher nichts anderes übrig, als die Abwehrmechanismen der Mikroben jedes Mal noch zu übertrumpfen.

Jahrzehntelang glaubten Mediziner, den Kampf gegen Krankheitskeime hätten sie unter anderem dank der Antibiotika so gut wie gewonnen. Erst die Erkenntnis, dass dieses Gefecht bei vielen pathogenen Bakterien ein steter Wettlauf um die besseren Waffen ist, brachte die Forschung über Mikrobenbekämpfung in Hochschulen und Industrie während der letzten zehn Jahre wieder in Schwung. Wissenschaftler weltweit suchen nun nach geeigneten Strategien, um in diesem Wettlauf vorn zu bleiben. Für neue Antibiotika wenden sie dazu Erkenntnisse aus der Genom- und Proteinforschung an. Auch die neuen Wirkstoffe werden sicherlich nur eine Zeit lang helfen. So verlautete kürzlich über Linezolid, das erste klinisch eingesetzte Antibiotikum eines neuen Typs seit zwanzig Jahren, dass bereits Resistenzen aufgetreten sind, nur ein Jahr nach der Zulassung in den USA. Davon dürfen die Forscher sich aber nicht entmutigen lassen. Die Studien an weiteren Substanzen sind bereits fortgeschritten. Zurücklehnen wird man sich nie dürfen – doch jedes fortschrittliche Medikament verspricht bei verantwortungsvollem Um-

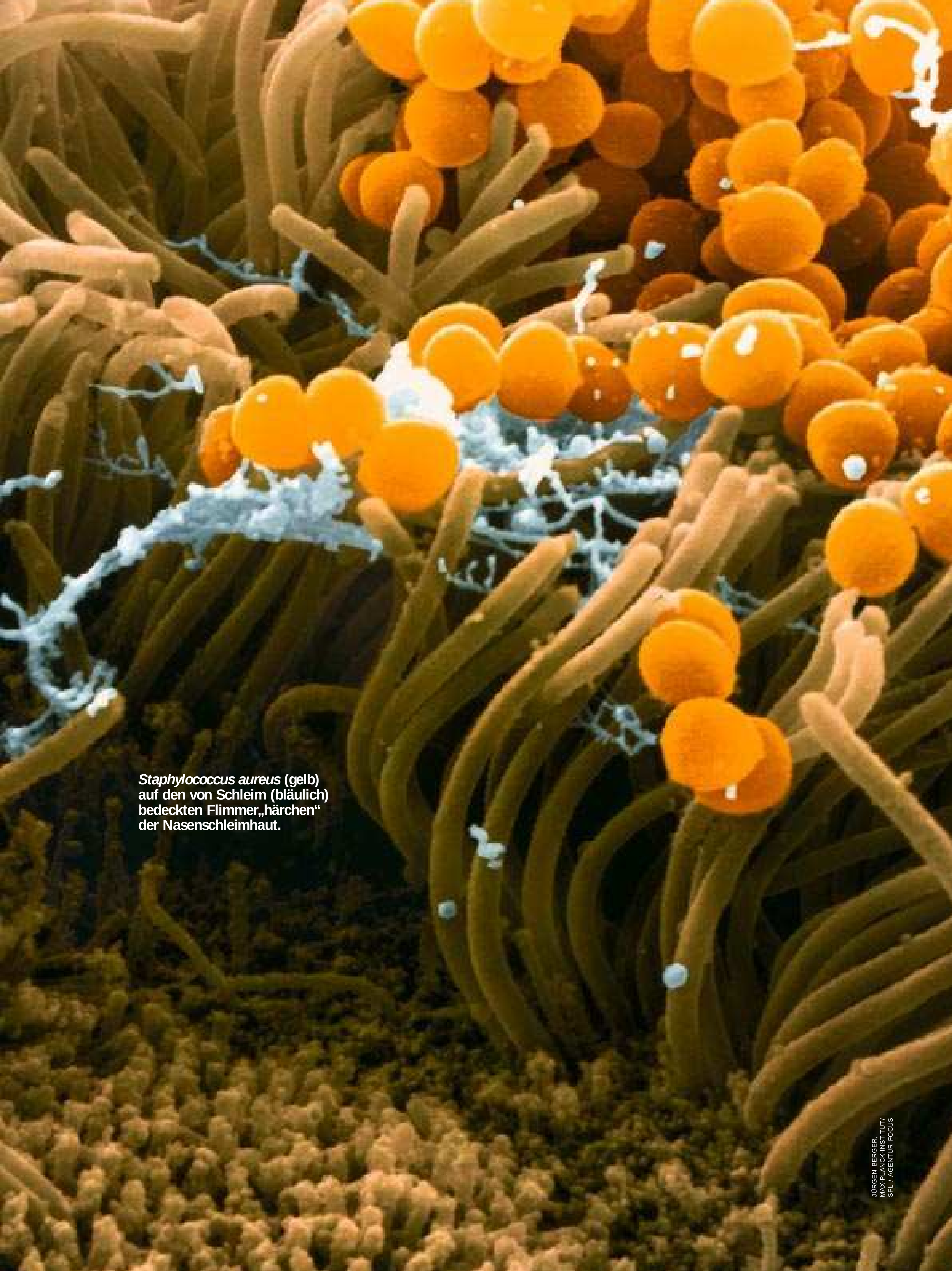
STECKBRIEF

Das Problem

Bakterien, die Antibiotika ausgesetzt sind, erwerben von Natur aus bald Abwehrmechanismen. Häufig benutzte Antibiotika verlieren darum mit der Zeit fast zwangsläufig ihre Durchschlagskraft.

Die Lösung

Wissenschaftler erforschen diese Abwehrmechanismen der Krankheitserreger und setzen sie gezielt außer Gefecht: mit maßgeschneiderten chemischen Verbindungen.



Staphylococcus aureus (gelb) auf den von Schleim (bläulich) bedeckten Flimmer„härchen“ der Nasenschleimhaut.

JÜRGEN BERGER, MAX-PLANCK-INSTITUT/ SPL / AGENTUR FOCUS

gang damit immerhin wieder eine Zeit lang Hilfe.

Fast alle bisherigen Antibiotika stammen letztlich aus der Natur, von Pilzen, Pflanzen und auch von Bakterien. Diese Organismen schufen solche Stoffe im Konkurrenzkampf um begrenzte Ressourcen als Waffe gegen störende Bakterien – und auch in der Natur entwickeln Mikroben Gegenstrategien, wenn sie solchen Giften ausgesetzt sind. Früher spürten Wissenschaftler die Wirksubstanzen nur auf und verbesserten sie teilweise, aber sie schufen nicht selbst neue Antibiotika.



Von diesen Vorgängen nahm erstmals 1928 der schottische Bakteriologe Alexander Fleming Notiz. Er züchtete damals am Londoner St. Mary's Universitätskrankenhaus in Kulturschalen Staphylokokken, Bakterien, die häufig Eiterungen, Wund- und Darminfektionen hervorrufen und deswegen im Klinikbetrieb gefürchtet sind. Doch eines der Gefäße war versehentlich verunreinigt worden: Auf dem Nährboden wuchsen auch Kolonien des grünen Schimmelpilzes *Penicillium notatum*. Der Schimmelpilz aber schien etwas abzusondern, das die Staphylokokken absterben ließ: das dann nach ihm benannte „Penizillin". Mediziner erkannten allerdings erst mehr als zehn Jahre später, dass dieser Stoff sich als Medikament für den Menschen eignet, weil er dessen Zellen nicht in gleicher Weise schädigt. Seitdem blühte die Antibiotikaforschung auf. Die Wissenschaftler entdeckten viele weitere Gifte von Pilzen und anderen Organismen, die Bakterien abtöten oder zumindest ihr Wachstum behindern, die unser Organismus aber toleriert.

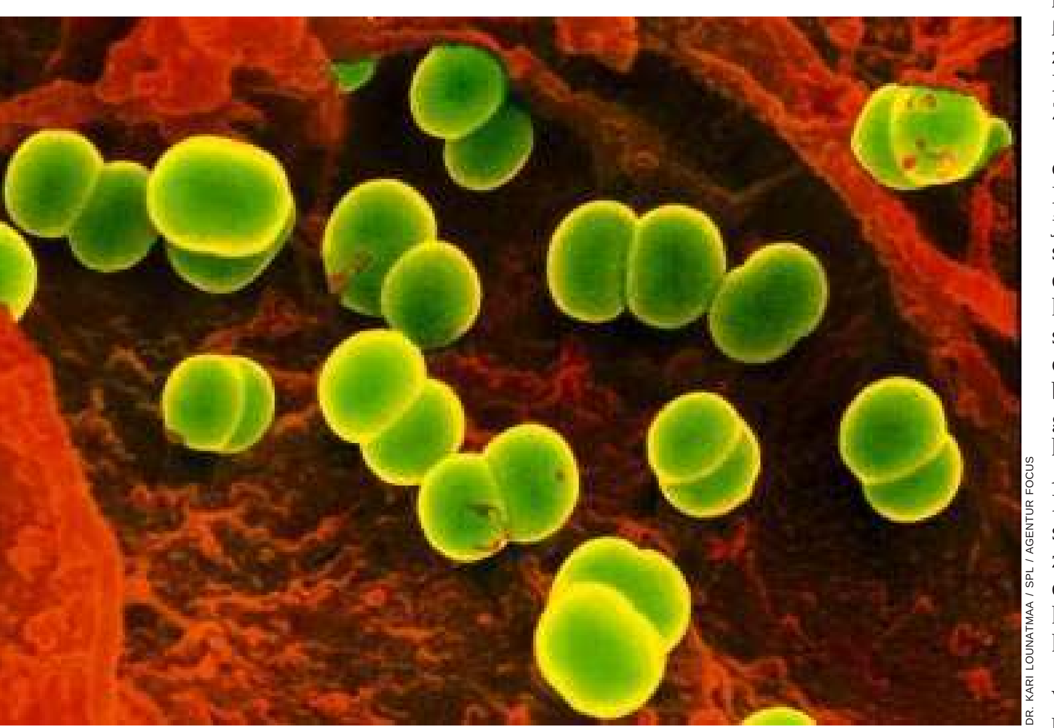
Zu den wichtigsten heutigen Antibiotika gehört das 1956 von Mitarbeitern des Pharma-Unternehmens Eli Lilly gefundene „Vancomycin". Um herauszufinden, wie dieser Stoff Bakterien tötet, brauchten Wissenschaftler dreißig Jahre: Er stört einen bestimmten Schritt bei der Zellwandsynthese. In dieser Weise wirken, wie wir inzwischen wissen, auch einige andere Antibiotika. Zusammen mit Vancomycin werden sie in der Klasse der „Glycopeptide" zusammengefasst. Neben ihnen kennen Biochemiker noch etwa sechs andere größere Antibiotikaklassen. Vancomycin gilt oft als letzter Rettungsanker bei Krankenhaus-Infektionen mit Stämmen des Eitererregers *Staphylococcus aureus*, die bereits gegen das sonst gebräuchliche Methicillin resistent sind. Um so alarmierender sind Meldungen der letzten Jahre von ersten Vancomycin-Resistenzen dieses Krankheitskeimes.

Verletzliche Zellwand

Der Wirkmechanismus von Vancomycin macht verständlich, wieso die Glykopeptide Bakterien vernichten, aber nicht menschliche Zellen. Anders als Bakterien besitzen unsere Zellen über der Außenmembran keine Zellwand, also keine zusätzliche feste äußere Stützstruktur. Ihnen verleiht stattdessen ein inneres Zellskelett Stabilität.

Doch Bakterien würden ohne eine dicke, Form gebende Zellwand am eigenen Innendruck zerplatzen. Eben das bewirkt jedoch Vancomycin. Solch eine Wand stellt gewissermaßen einen Filz aus miteinander verwobenen, von Enzymen verknüpften Molekülen dar. Hauptsächlich sind dies Zucker und Peptide. Die Zuckermoleküle sind in langen Ketten verbunden und bilden sozusagen ein Grundgerüst. Und an jedem zweiten Zucker hängt ein Peptid, eine kurze Kette aus Aminosäuren, den Bausteinen auch von Proteinen. Jeweils zwei dieser Peptide sind miteinander verknüpft. So bilden sie zwischen den Zuckerketten in verschiedenen Richtungen Brücken. Biochemiker nennen den verwobenen Molekülkomplex „Peptidoglykan".

Eine Bakterienzelle muss an ihrer Wand ständig herumbauen, um schadhafte Stellen auszubessern und die Fläche zu vergrößern, wenn sie wächst. Doch Vancomycin verhindert die Verknüpfung der Peptide. Es verwehrt ei-



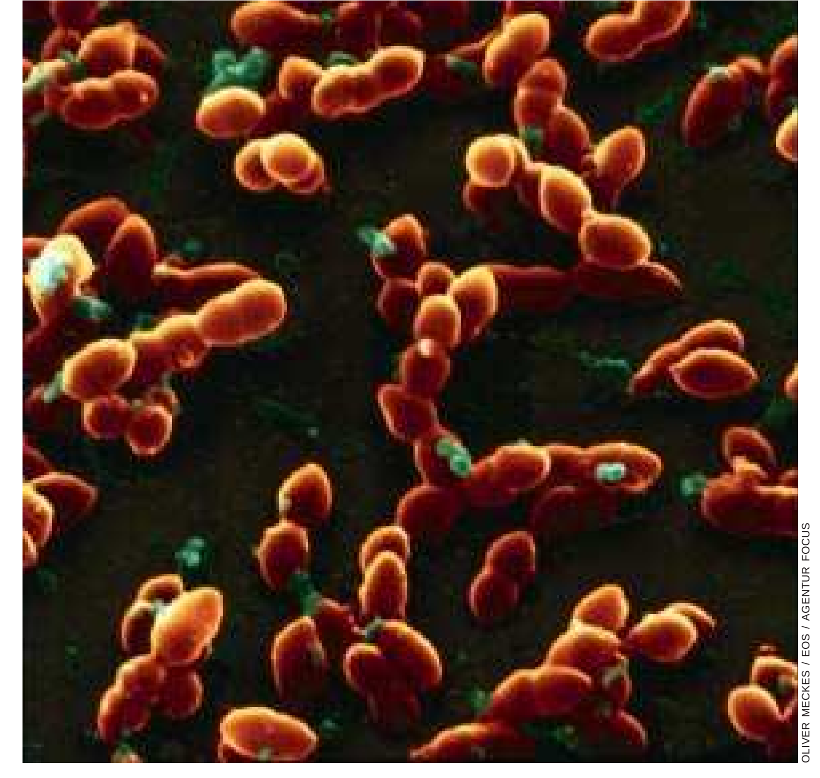
DR. KARI LOUNATMAA / SPL / AGENTUR FOCUS

Eine *Enterococcus*-Art (hier grün angefärbt) auf einem Stück Bratwurst. Die im menschlichen Darm lebenden, meist harmlosen Bakterien können Lebensmittelvergiftungen sowie Wund- und Harnwegsinfekte oder Hautgeschwüre hervorrufen.

nem Enzym den Zugriff, das die Peptide verbindet und dazu vorher ihre letzte Aminosäure abspalten muss. Das Antibiotikum passt nämlich hervorragend an das noch unverbundene Ende der Peptidketten und „besetzt“ es. Folglich wird die Bakterienwand instabil, und die Zelle zerplatzt.

Bakterienstämme aber, die gegen Vancomycin resistent sind, bieten dem Antibiotikum einfach nicht mehr die passgenaue Angriffsfläche. Wissenschaftler untersuchten diesen Mechanismus an Vancomycin-resistenten Enterokokken: an sich meist ungefährliche Darmbakterien, die unter Umständen allerdings bedrohliche Infektionen verursachen können. Erste gegen das Medikament widerstandsfähige Varianten tauchten in den späten achtziger Jahren auf. Normalerweise würde Vancomycin zu den endständigen Aminosäuren der Peptidketten fünf so genannte Wasserstoffbrücken ausbilden, schwache chemische Bindungen – als würde es sich daran mit fünf Fingern festkrallen. Doch bei den resistenten Bakterien kann das Antibiotikum sich nur noch mit vier „Fingern“ anklammern: An der letzten Aminosäure ist ein Stickstoff–Wasserstoffpaar gegen Sauerstoff ausgetauscht. Der Giftstoff sitzt nun so locker, dass Enzyme des Erregers ihn wieder entfernen können und die Zelle ihre stabile Wand trotzdem bauen kann. Durch diese winzige Veränderung sinkt die Wirksamkeit von Vancomycin auf ein Tausendstel.

Im Gegenzug versuchen die Forscher, Vancomycin mehr Angriffsstärke zu verleihen. Sie entdeckten zum Beispiel, dass einige andere Glycopeptid-Antibiotika lange, Wasser abstoßende Ketten tragen. Diese Ketten haben eine hohe Affinität zu den – ebenfalls Wasser abstoßenden – Bausteinen der bakteriellen Zellmembran unterhalb der Zellwand, wo sich diese Antibiotika deswegen gut verankern können. Mit solchen Ketten versahen Wissenschaftler von Eli Lilly auch ▶


OLIVER MECKES / EOS / AGENTUR FOCUS

***Streptococcus pneumoniae*, der zu den Pneumokokken gehört, lebt auf den Schleimhäuten der oberen Atemwege. Er kann in die Lungen und Nebenhöhlen vordringen und Entzündungen hervorrufen.**

Antibiotika verlieren an Wirkung

Eine Reihe von Antibiotika hat ihre Kraft gegen manche Stämme gefährlicher Krankheitserreger erheblich eingebüßt. Hier aus den späten neunziger Jahren einige Fälle resistenter Bakterienstämme von verschiedenen Kliniken weltweit. Zum Beispiel erwies sich ein Stamm von *Staphylococcus aureus* in Korea zu 98 Prozent resistent gegen Penizillin (oben links). Ein anderer Stamm des gleichen Erregers in den USA war zu 32 Prozent widerstandsfähig gegen Methicillin (unten links). Bisher waren die hier angeführten Stämme aber nicht resistent gegen Vancomycin – noch nicht.





ERIC O'CONNELL

Ein Arbeitsplatz im Labor mit Geräten, um chemische Verbindungen aufzureinigen oder neue herzustellen. In den Aufbauten rechts laufen chemische Reaktionen in einer Argon-Atmosphäre ab. Das Gas aus den Ballons schützt empfindliche Moleküle vor Sauerstoff und Wasser in der Luft.

Vancomycin. Das abgewandelte Molekül wird bereits klinisch erprobt. Es erweist sich tatsächlich als wirksam gegen Vancomycin-resistente Enterokokken.

Wir selbst verfolgen einen anderen Weg. Manche Antibiotika der Glycopeptid-Klasse bilden Zweierkomplexe und agieren so gleichsam mit vereinten Kräften. Auch von Vancomycin lassen sich solche Doppelmoleküle herstellen, was ihren Zugriff in der Zellwand deswegen verbessert, weil mehr Wirksubstanz zugegen ist: Wenn einer der Partner eine Bindungsstelle findet, bringt er einen zweiten zur Verstärkung mit. Wir arbeiten daran, Varianten des Antibiotikums herzustellen, die bereitwilliger Paare bilden als bisherige. Kürzlich konnten wir eine Anzahl solcher Doppel-Moleküle gewinnen, die sich als ausgesprochen wirksam gegen Vancomycin-resistente Enterokokken erweisen.

Doch Enterokokken können Vancomycin noch auf andere Weise widerstehen, mit einem erst kürzlich entdeckten Mechanismus. In dem Fall hängen sie an das Ende der Peptidkette in der Zellwand eine zusätzliche Aminosäure, die viel größer ist als die übrigen – als würden sie einen breitschultrigen Wachposten vor den Eingang stellen, an dem Vancomycin nicht vorbeikommt. Das Wettrennen wird also weitergehen.

Bestimmte Stämme des gefürchteten Eitererregers *Staphylococcus aureus* haben allerdings wieder eine andere Lösung gefunden, Vancomycin auszutricksen. Das Bakterium bildet kurzerhand eine dickere Zellwand. Zugleich reduziert es die Quervernetzungen zwischen Peptiden. Für diese Zellen macht es keinen Unterschied, wenn sich Vancomycin an die Peptidketten setzt.

Suche nach der Achillesferse

Diese Beispiele zeigen, dass kleinste Abweichungen in einzelnen Molekülen über die Wirksamkeit von Antibiotika entscheiden können. Das gilt für die Krankheitserreger ebenso wie für die gegen sie eingesetzten Medikamente. Und weil Bakterien immer neue Schliche finden, muss die Wissenschaft ständig die alten Antibiotika aufpolieren und auch immerfort neue liefern. Aus verschiedenen Gründen kann sie dabei allerdings nicht mehr so vorgehen wie früher.

Jahrzehntelang wurden antibiotikaverdächtige Stoffe an Kulturen mit lebenden Bakterien getestet – insgesamt mit beträchtlichem Erfolg, wie schon die Entdeckung von Vancomycin beweist. Diese Methode war recht praktisch, denn erstens war die Arbeit überschaubar und zweitens konnte man die Substanzen gewissermaßen blind prüfen, musste also nicht vorher wissen, wo in der Bakterienzelle ein Stoff angreifen würde. Falls ein Erreger irgendwo eine verwundbare Stelle für das getestete Molekül besaß, erwischte man die so zwangsläufig.

Ein Nachteil des Verfahrens ist aber, dass auch in unseren Zellen vielfach die gleichen Angriffspunkte existieren. Viele der biochemischen Abläufe sind bei uns ja ähnlich wie in Bakterien. Die entsprechenden Stoffe sind dann auch für den Menschen giftig. Aus heutiger Sicht stört an dem früheren Vorgehen aber besonders, dass es nicht aufzeigt, wo und wie ein bestimmter Giftstoff genau wirkt, also was er in der Bakterienzelle eigentlich macht. Ohne präzisere Kenntnisse hiervon lässt sich heutzutage praktisch kein Medikament mehr bis zum therapeutischen Einsatz bringen.

Heute gehen die Wissenschaftler darum meist anders vor. Sie testen nicht

mehr die Wirkung von Substanzen auf komplette Bakterien, sondern überprüfen von vornherein den Effekt auf bestimmte molekulare Mechanismen. Sie würden zum Beispiel gezielt nach Hemmstoffen für das Enzym suchen, das die Peptidketten in der Bakterienwand verknüpft. Der Aufwand lohnt, denn wenn sich eine Substanz als wirksam erweist, kennt man schon ihr Angriffsziel. Dennoch waren die Forscher bisher mit diesem Verfahren nicht völlig zufrieden. Weil sie gewöhnlich nur den Effekt auf jeweils ein Enzym kontrollieren konnten, in Zellprozesse aber oft zahlreiche Enzyme eingebunden sind, kostete die Methode entsprechend viel Zeit. Deswegen versuchen Biochemiker nun, die Vorteile der früheren und dieser Vorgehensweise zu verbinden. Sie verlagern dazu ganze Stoffwechselwege von Bakterien ins Reagenzglas und können so komplette Reaktionssysteme – Systeme mit vielen beteiligten Enzymen – durchchecken. Wenn der betreffende Stoffwechselprozess zusammenbricht, bedeutet dies, dass die Testsubstanz entweder eines der beteiligten Enzyme entscheidend stört oder eine größere Anzahl von ihnen irritiert.

Dass neue Antibiotika heute mit wesentlich größerem Durchsatz getestet werden können, verdanken wir auch der Automatisierung und Miniaturisierung der Prüfverfahren. Robotik ermöglicht, in einer Woche Tausende von Verbindungen zu untersuchen. Modernste Anlagen durchmustern sogar Hunderttausende chemischer Substanzen am Tag. Zugleich sinken die Einzelkosten beträchtlich, weil immer geringere Mengen an Reagenzien ausreichen.

Genomik verhilft zu neuen Angriffszielen

Die rasche Durchmusterung wiederum stellt Chemiker vor das Problem, überhaupt genügend neue Moleküle zu liefern. Doch die so genannte kombinatorische Chemie macht dies möglich. So bezeichnen Wissenschaftler automatisierte Verfahren, mit denen sie in kurzer Zeit unzählige neue Molekülvarianten gewinnen. Wahrscheinlich werden auch Bakterien selbst zukünftig neue Testmoleküle synthetisieren helfen. Die Idee ist, die Mechanismen der Antibiotika-Produktion von Mikroben auszunutzen, die Bakterien aber genetisch so zu programmieren, dass sie abgewandelte Versionen des Moleküls bilden.

Auch sonst nutzen wir bei der Suche nach neuen Antibiotika in hohem Maße die jüngsten Entwicklungen in der Genomik und Molekularbiologie. Erkenntnisse über den genetischen Apparat, besonders über die Proteinsynthese sowie über die Funktion von bestimmten Proteinen erlauben, gewissermaßen hinter die Kampflinien der Erreger vorzudringen und gezielt deren eigene molekulare Abwehr auszutricksen. Genetiker und Biochemiker rüsten dabei an allen Fronten: Sie attackieren essenzielle – lebenswichtige – Gene, den Prozess der Proteinsynthese und die Eiweißstoffe. Zu ihren Zielen gehört unter anderem, pathogene Bakterien ihrer Infektiosität zu berauben oder ihnen die Fähigkeit zu nehmen, eine Resistenz auszubilden. Wie erreichen sie das?

Viele der bekannten Antibiotika behindern in den Erregern irgendwelche lebenswichtigen Funktionen. Die Suche nach den dafür verantwortlichen essenziellen Genen hat zwar erst eingesetzt. Doch Forscher vermögen die unverzichtbaren Gene eines Organismus bereits relativ schnell aufzuspüren, indem sie systematisch jede einzelne seiner Erb- ▶

CNRI / SPL / AGENTUR FOCUS

Oben Reste einer ausgelaufenen Zelle von *Staphylococcus aureus* nach Antibiotikabehandlung. Unten eine sich teilende Zelle.

Literaturhinweise

Antibiotikaresistenz: eine globale Herausforderung. Von Stuart B. Levy in: Spektrum der Wissenschaft, 5/1998, S. 34.

Antibiotikaresistenz. Von Antoine Adremont et al. in: Spektrum der Wissenschaft, 7/1997, S. 50.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei **www.spektrum.de** *unter „Aktuelles Heft".*

anlagen außer Betrieb setzen. Sie erfahren dabei auch viel über die Funktion von anderen, nicht unbedingt überlebenswichtigen Erbanlagen, auf die man ebenfalls Antibiotika ansetzen könnte.

Zu dieser Fraktion gehören die Erbsequenzen für die so genannten Virulenzfaktoren, die dem Erreger helfen, einen menschlichen Wirt überhaupt zu befallen und sich im Organismus auszubreiten – nämlich dessen Immunreaktion zu umgehen. In der Vergangenheit ließen sich die Gene dafür sehr schwer finden, denn sie werden erst durch bestimmte Abläufe im Wirtsgewebe aktiviert. Diese Vorgänge lassen sich im Labor kaum nachstellen. Mittlerweile können Wissenschaftler aber im lebenden Erreger praktisch jedes beliebige Gen mit einer definierten DNA-Sequenz inaktivieren und damit zugleich markieren. Mit so modifizierten Mikroben infizieren sie dann einen Wirtsorganismus, um zu schauen, auf welche der inaktivierten Gene der Erreger beim Infektionsprozess nicht verzichten kann. Konkret prüfen sie, ob manche Gene in später gewonnenen Proben keine Markierung mehr tragen. Darunter sollten folglich die Gene für Virulenzfaktoren sein.

Schon lange wünschen sich Mediziner, die Virulenzfaktoren von pathogenen Bakterien hemmen zu können. Sie vermuten, dass das Immunsystem dann eines Erregers Herr würde, bevor der sich breit macht. Und es sieht so aus, als stimme diese Idee. Als Wissenschaftler kürzlich einen Virulenzfaktor von *Staphylococcus aureus* mit einem künstlichen Molekül hemmten, vermochten damit infizierte Mäuse dem verheerenden Keim Widerstand zu leisten und die Infektion zu überwinden.

Ein weiteres Angriffsziel sind Gene und deren Proteine, die Bakterien zur Resistenz gegen Antibiotika verhelfen. Ließen sich die betreffenden Erbfaktoren beziehungsweise deren Genprodukte ausschalten, würden bislang nicht mehr wirksame Medikamente wieder einsetzbar. Diesen Ansatz verfolgen Mediziner bei den Beta-Lactam-Antibiotika, zu denen die Penizilline gehören. Auch diese Antibiotika-Gruppe blockiert die Synthese der Bakterienzellwand: Sie hemmen das Enzym, welches die Peptidketten verknüpft. Die meisten Penizillin-resistenten Bakterien bilden zur Gegenwehr ein weiteres Enzym, Beta-Lactamase, das in dem Antibiotikum eine chemische Bindung aufbricht. Das Penizillin erhält dadurch eine andere räumliche Struktur und vermag deswegen das Verknüpfungsenzym nicht mehr zu behindern. Gegenmittel, welche Beta-Lactamase nicht zum Zuge kommen lassen, machen darum die Antibiotika wieder effektiv. Genau das ist das Geheimnis des Breitspektrum-Medikaments Augmentan. Das Kombinationspräparat enthält das Penizillin Amoxicillin und als Hemmstoff die damit verwandte Clavulansäure.

Bereits jetzt gibt es Methoden, um zu bestimmen, welche Gene in einer Zelle gerade abgelesen werden. Bald wird es zur alltäglichen Routine gehören, auf diese Weise Virulenzfaktoren und Resistenzmechanismen aufzuspüren. Die Forscher werden dann sozusagen beobachten, welche Gene das Bakterium augenblicklich benutzt. Virulenzfaktoren zum Beispiel machen sich verdächtig, weil deren Gene erst deutlich aktiv sind, wenn der Erreger einen Wirt infiziert. Und Gene für Antibiotika-Resistenzen sind besonders gefragt, wenn die Bakterien dem Medikament ausgesetzt sind.

Schwachstelle Proteinsynthese

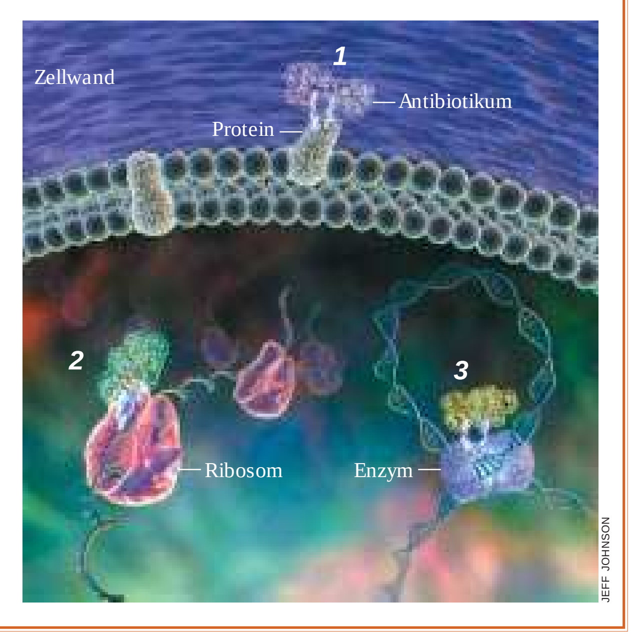
Solche Gene dürfen solange schweigen, wie sich die Zelle nicht gegen das Gift schützen muss. Obwohl diese Untersuchungsverfahren noch sehr jung sind, lassen sich damit jetzt schon Umschläge und feinere Veränderungen in der Genaktivität erkennen. Musterverschiebungen sollten den Wissenschaftlern zukünftig ebenfalls anzeigen, ob eine Substanz einen völlig neuen Wirkmechanismus hat oder ob sie die Zelle an einer Stelle angreift, die der Antibiotika-Forschung neue Felder eröffnet.

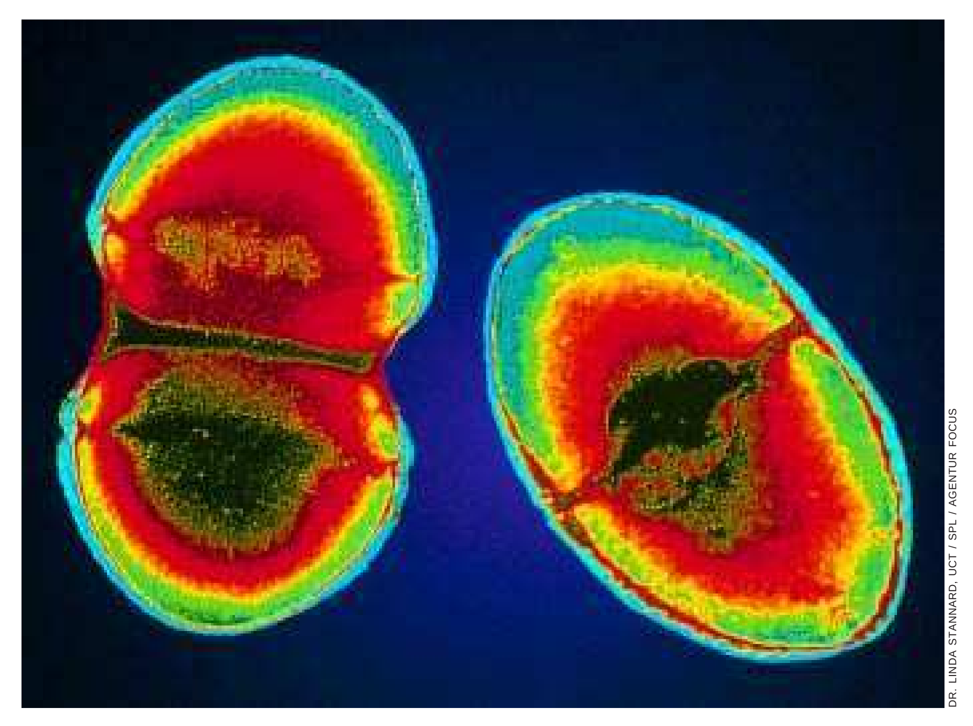
Auch die Enzymsynthese (oder allgemeiner Proteinsynthese) selbst bietet verschiedene direkte Angriffspunkte für Antibiotika. Dabei haben es die Mediziner besonders auf Moleküle aus „Ribonucleinsäure" – RNA – abgesehen, die mit der Erbsubstanz DNA chemisch verwandt ist. Sowohl die direkte Genabschrift für Enzyme besteht daraus als unter anderem auch wesentliche Teile der Ribosomen, jener großen Gebilde, in denen die Zellen ihre Proteine herstellen.

Die Ribosomen enthalten die meiste der in einer Zelle vorhandenen RNA. Weil diese Proteinfabriken sich nicht selbst zu reparieren vermögen, sind sie besonders verletzlich. Für Antibiotika bietet die ribosomale RNA gleich mehrere Bindungsstellen. 1987 wiesen Wissenschaftler nach, dass Wirkstoffe der Aminoglykosid-Gruppe, zu der Streptomycin

Angriffsziele einiger Antibiotika

Die bislang bekannten Antibiotika bewirken, dass Bakterien für sie wichtige Moleküle nicht mehr herstellen können. Die Beta-Lactam-Antibiotika beispielsweise stören den Zellwandaufbau (1), wie auf andere Art auch Vancomycin. Erythromycin und Tetracyclin greifen die Ribosomen an, die Proteinfabriken der Zelle (2). Die Quinolon-Antibiotika wiederum hemmen Enzyme, die an der Verdopplung der DNA beteiligt sind (3). Das gleiche Angriffsziel haben die Sulfonamide (nicht gezeigt).




DR. LINDA STANNARD, UCT / SPL / AGENTUR FOCUS

Enterokokken in charakteristischen Paaren. An Erregern dieser Gruppe konnten Wissenschaftler bestimmte Resistenzmechanismen gegen das wichtige Antibiotikum Vancomycin aufklären und verschiedene Gegenstrategien erproben.

gehört, an diese RNA binden. Wenn das geschieht, lesen die Ribosomen die Genabschrift nicht mehr korrekt und stellen unbrauchbare Proteine her. Nur sind viele dieser Substanzen leider auch für den Menschen giftig und daher von begrenztem medizinischen Nutzen. Sie gelten eher als Medikamente für Notfälle. Kürzlich gelang es aber Mitarbeitern des Scripps Forschungsinstituts in La Jolla (Kalifornien), ein künstliches Doppelmolekül herzustellen, das für den Menschen weniger toxisch sein könnte.

Im Wettlauf vorn bleiben

Die RNA-Moleküle, die eine Bauanleitung für Enzyme darstellen, bieten sich für medizinische Eingriffe schon deswegen an, weil zu jedem Protein eine spezifische RNA-Sequenz vorkommt. Es liegt nahe, unerwünschte Moleküle solcher so genannten Boten-RNA gezielt auszuschalten. Diese RNA entsteht – gewissermaßen als Negativkopie eines Gens – immer dann, wenn die Zelle das entsprechende Protein benötigt. Nach der Herstellung wandert sie vom Gen zum Ribosom. Im Prinzip könnte man sie irgendwo abfangen.

Da gäbe es etwa die Möglichkeit, störende Boten-RNA mit ganz kleinen organischen Molekülen zu malträtieren, die sich an einer bestimmten Stelle der RNA festsetzen können. Das würde die Enzym-Schablone unbrauchbar machen. Beim Immunschwächevirus HIV gelang Wissenschaftlern dieser Ansatz bereits.

Große Aufmerksamkeit gilt aber auch der „Antisense-Therapie“, bei der unbequeme Boten-RNA regelrecht eine maßgeschneiderte Zwangsjacke erhält. Hier stellt man, ebenfalls aus RNA, eine genaue Negativkopie der unerwünschten Sequenz her. Diese Kopie klammert sich fest an die Boten-RNA und setzt sie so außer Gefecht. Manchmal kann das Antisense-Molekül sein Opfer sogar zerstören. Kürzlich hat das US-amerikanische Gesundheitsministerium das erste Antisense-Mittel zugelassen: einen Wirkstoff gegen das menschliche Zytomegalie-Virus. Geeignete Medikamente gegen bakterielle Infektionen lassen allerdings noch auf sich warten. Bisherige Substanzen sind für Menschen zu giftig. Und es gelingt auch noch nicht, genug Wirkstoff an Ort und Stelle zu bringen. Trotz der Schwierigkeiten halten Wissenschaftler den Ansatz für viel versprechend.

Wie all dies zeigt, lassen sich die Genomik und andere molekulare Disziplinen aus der modernen Antibiotikaforschung nicht mehr wegdenken. Erst der präzise Einblick in molekulare Abläufe bei Bakterien lenkt das Augenmerk der Forscher auf viele lohnende Angriffsziele in deren Zellen. Dadurch umschiffen sie auch das Dilemma, mit dem Mediziner in den vergangenen Jahrzehnten oft konfrontiert waren: dass neu entwickelte Antibiotika sich nicht zur Behandlung eignen, weil sie auch für Menschen giftig sind. Heute kann man durch Genvergleich vorher feststellen, ob der Mensch ein mögliches Zielmolekül ebenfalls aufweist oder nicht. Und ein Genvergleich zwischen Bakterien zeigt, ob das Medikament voraussichtlich ein breites Spektrum von Erregern schädigt, weil viele Bakterien die betreffende Erbsequenz besitzen, oder ob es nur ganz wenige Pathogene angreifen kann.

Könnten Ärzte in Zukunft bei einer Infektion am genetischen Profil und der Genaktivität des Mikroorganismus früh feststellen, welcher Erregerstamm den Patienten befallen hat, genügte zur Behandlung ein selektiv wirkendes Antibiotikum, das im Idealfall nur diese Teilpopulation, nicht aber andere Varianten der Bakterienart schädigte. Das hätte den Vorteil, dass in der Erregerpopulation insgesamt weniger Selektionsdruck herrschte, eine Resistenz zu entwickeln. Solche Analysen könnten schon bald zum medizinischen Alltag gehören.

Zwar erscheinen die Aussichten, dass auch künftig schlagkräftige Antibiotika verfügbar sein werden, besser als seit Jahrzehnten, nach den euphorischen Anfängen und den vielen herben Rückschlägen in der Folgezeit. Nur wissen wir jetzt: Der Kampf gegen Pathogene mit chemischen Waffen und die Herstellung von Resistenzen dagegen sind uralt. Aufgeben werden die Bakterien ihn wohl nie. Gegen jedes neue Medikament werden sie eine Abwehr finden, und wenn sie nur in einem Molekül ein einziges Atom austauschen. Für uns kommt es vor allem darauf an, unser Arsenal – obwohl es wächst – nicht zu verschwenden, sondern die Waffen sehr überlegt und verantwortungsvoll einzusetzen. Dann dürfen wir hoffen, in dem Kampf zumindest nicht zu unterliegen. ■


__K. C. Nicolaou__ ist Präsident des Fachbereichs Chemie am Scripps Forschungsinstitut in La Jolla (Kalifornien). Er hält dort den Darlene Shiley Lehrstuhl für Chemie, die Aline W. und L. S. Skaggs-Professur in chemischer Biologie sowie eine Professur an der Universität von Kalifornien in San Diego. __Christopher N. C. Boddy__ hat vor kurzem am Scripps Institut über die Synthese von Vancomycin promoviert.

Die Autoren danken Nicolas Winssinger und Joshua Gruber für wertvolle Diskussionen und ihre Hilfe bei der Erstellung dieses Artikels.

UMTS

STANDARDS

Die Schritt-Macher

In drei Stufen soll der Mobilfunk schneller werden, den vorläufig krönenden Abschluss bietet der Standard UMTS.

Von Antonia Rötger

Im Sommer 2000 verfolgte manch einer ungläubig eine öffentliche Versteigerung in der Tagespresse. In Deutschland erwarben sechs Unternehmen und Konsortien – T-Mobil, Mannesmann Mobilfunk, Mobilcom/France Telecom, E-Plus/Hutchison, Viag Interkom und Telefonica/Sonera – für insgesamt 99,5 Milliarden Mark vom Staat das Recht, zwanzig Jahre lang bestimmte Frequenzen um zwei Gigahertz (Milliarden Hertz) für künftigen Mobilfunk zu nutzen.

Dahinter steht die mittlerweile oft angezweifelte Hoffnung, ab 2003 einen gigantischen Markt zu bedienen: Handy, Notebook und Organizer sollen Tore zu einer multimedialen Netzwelt werden, die nicht mehr an fest verlegte Leitungen gebunden ist. Surfen und Einkaufen im Internet, Bankgeschäfte und mobiles Büro, Spiele, aktuelle Straßenkarten und Telefonieren mit und ohne Bild – mit der UMTS genannten Technik (Universal Mobile Telecommunications System) sind theoretisch Datenraten von zwei Megabit pro Sekunde (Mbps) erreichbar, das ist 200-mal mehr, als mit heutigen Handys möglich, und 30-mal schneller als eine ISDN-Leitung.

Zur Zeit telefonieren die meisten Mobilfunknutzer mit Datenraten von 9,6 Kilobit pro Sekunde (kbps), was fürs Telefonieren und zum Versand kurzer Textmeldungen (SMS, Short Message Service) ausreicht, für den Empfang einfach aufgebauter Internet-Seiten trotz der speziellen WAP-Sprache (Wireless Application Protocol) aber schon mit längeren Wartezeiten verbunden ist. Diese Netze arbeiten nach dem digitalen GSM-Standard (Global System for Mobile Communication).

Jedes Gespräch im GSM-Netz findet auf einem festen Frequenzkanal statt, der beim D-Netz zwischen 880 und 960 Megahertz (MHz) und beim E-Netz zwischen 1710 und 1880 MHz liegt. In diese Frequenzbänder passen einige hundert Funkkanäle mit einer Bandbreite von 0,2 MHz. Jeder dieser Kanäle wird nochmals in acht „Zeitschlitze“, so genannte „virtuelle Kanäle“, unterteilt, die sich nach jeweils 0,57 Millisekunden abwechseln. Auf einer bestimmten Frequenz können also maximal acht Personen telefonieren, das ständige Umschalten erfolgt für die Sprecher unmerklich.

Auf dem Weg zu UMTS sollen nun drei Erweiterungen von GSM mit immer höheren Datenraten den Markt vorbereiten – für manche Anwendungen machen sie allerdings UMTS bereits Konkurrenz. So ist es eine nahe liegende Idee, einige

Wunschzettel an den Mobilfunk

Soll die multimediale, vollvernetzte Mobilfunkwelt Wirklichkeit werden, müssten sich die Betreiber noch einiges einfallen lassen, um die erforderlichen Datenraten zu bewältigen.

Mobilfunk der dritten Generation

Vier Buchstaben, mit denen die Telekommunikations-branche große Hoffnungen verbindet, die auch für „Internet und Video per Handy“ stehen sollen. Doch ob sich die teuren Lizenzen für die nächste Mobilfunk-Generation wirklich lohnen, bezweifeln manche Skeptiker. Was ist dran an UMTS?

INHALT

der acht virtuellen Kanäle wieder zu bündeln, um mehr Daten zu befördern. Das so genannte High Speed Circuit Switched Data-Verfahren (HSCSD), das inzwischen fürs D2- und E-Plus-Netz angeboten wird, fasst maximal vier Kanäle zusammen, um den Energieverbrauch im Handy und die Auslastung des Netzes nicht zu sehr in die Höhe zu schrauben. Da zugleich ein anderes Fehlerkorrekturverfahren als beim „klassischen“ GSM benutzt wird, erreicht jeder Kanal zudem 14,4 statt 9,6 kbps. Insgesamt stehen also bis zu 57,6 kbps zur Verfügung, das entspricht immerhin schon einem handelsüblichen PC-Modem im Festnetz.

UMTS wird, wie im Internet üblich, alle Daten, ob Telefongespräche, E-Mails, Programmdateien oder Videos, als Strom kleiner Datenpakete versenden. Der Weg, den das einzelne Päckchen vom Sender zum Empfänger nimmt, richtet sich nach dem aktuellen Zustand des Netzes; am Ende setzt eine spezielle Software alles wieder zusammen. Ein solches Vorgehen nutzt die vorhandenen Ressourcen wesentlich effektiver aus als die feste Kanalzuweisung. Wie gut sich dieses Prinzip für den Mobilfunk eignet, erprobt derzeit der General Packet Radio Service (GPRS). Auch hier werden zudem virtuelle GSM-Kanäle zusammengefasst. Bei maximaler Kanalbündelung wäre eine Rate von 171,2 kbps möglich – sofern der Nutzer der Einzige wäre, der von der Funkzelle Gebrauch macht. In der Realität sinken die GPRS-Raten aber schnell auf etwa 40 kbps.

Statt nach der Nutzungszeit wird dieser Dienst nach dem Datenaufkommen abgerechnet, was für den Kunden den Vorteil hat, dass er ständig online sein kann: Er bezahlt nur für die tatsächlich übertragenen Daten. Derzeit gibt es aber nur wenige Anbieter von GPRS-Handys, und die Tarife sind so teuer, dass eine Nutzung fast nur für professionelle Anwender in Frage kommt.

Als leistungsfähigste GSM-Erweiterung ist EDGE geplant (Enhanced Data Rate for the GSM Evolution). Ein neues Modulations- und Kodierungsverfahren soll die Geschwindigkeit nochmals verdreifachen, sodass bei einer Bündelung von acht Kanälen bis zu 553,6 kbps pro Nutzer durch den Äther rauschen können. EDGE wird vor allem von Betreibern der GSM-Netze angeboten werden, die keine UMTS-Frequenzen ersteigert haben und somit auf den alten Frequenzbändern Dienste anbieten müssen.

Ab 2003 soll dann für mindestens 25 Prozent der Bevölkerung UMTS verfügbar sein. Lizenziert wurden zwei Fre-



Video per Handy: Wer's braucht, der kriegt's – wenn er gut zahlt und beim Empfang möglichst still steht.

SIEMENS

DIE VERSPRECHEN

Standard / Anwendung	Übertragungsrate in Kilobit pro Sekunde	E-Mail mit 25 Kilobit	Powerpoint-Präsentation mit Grafiken, insgesamt 16 Megabit	15 Minuten Video, 2,4 Gigabit
GSM	9,6	2,6 Sekunden	27,8 Minuten	2,9 Tage
HSCSD	maximal 57,6	0,43 Sekunden	4,6 Minuten	11,5 Stunden
GPRS	maximal 171,2	0,15 Sekunden	1,6 Minuten	3,9 Stunden
EDGE	maximal 553,6	0,05 Sekunden	28,9 Sekunden	1,2 Stunden
UMTS Mikrozelle	maximal 384	0,07 Sekunden	41,7 Sekunden	1,7 Stunden
UMTS Pikozelle	maximal 2000	0,01 Sekunden	8 Sekunden	20 Minuten

Das sollen die Mobilfunkstandards leisten: An den Übertragungszeiten für typische Anwendungen wird deutlich, wie stark es von den Bedürfnissen der Nutzer abhängt, welche Verfahren sich durchsetzen werden.

quenzbänder mit je 60 MHz und eines von 30 MHz Breite zwischen 1920 und 2170 MHz. Jedes Band wird wiederum in schmälere von fünf MHz Breite unterteilt. Dank eines neuen Verfahrens, das sich von GSM deutlich unterscheidet, kann UMTS wesentlich höhere Datenraten erreichen. Dafür müssen Hard- und Software der Sendeanlagen vollkommen geändert werden; immerhin dürfen die verschiedenen Konsortien dabei kooperieren, um Kosten zu sparen.

UMTS arbeitet nicht mehr mit unterschiedlichen Frequenzkanälen und Zeitschlitzen wie GSM. Jede Funkverbindung nutzt stattdessen die gleiche spektrale Bandbreite von fünf MHz. Das Signal für das eine Handy unterscheidet sich nur dadurch von dem eines anderen, dass es mit einem anderen Code verschlüsselt wurde. Das Endgerät empfängt also eine Vielzahl überlagerter Signale, kann aber mit dem mitgeschickten Code ausschließlich die an seine Adresse gerichteten entschlüsseln. Das erledigt der Algorithmus Code Division Multiple Access (CDMA), den das amerikanische Unternehmen QualComm Mitte der 1980er Jahre aus einem ursprünglich militärischen Verfahren für die zivile Nutzung weiterentwickelt hat.

UMTS wird in den nächsten Jahren zunächst in Großstädten eingeführt. Welche Datenraten in der Praxis zu erreichen sind, hängt zum einen von der Größe der Funkzelle ab, die ein einzelner Sender beliefert. Die genannten zwei Megabit pro Sekunde lassen sich nur in so genannten Pikozellen von etwa zehn Metern Durchmesser erreichen, also in unmittelbarer Nähe eines Senders und geringer Bewegung der Empfänger. Bei einem solchen quasistationären Betrieb entfallen sowohl die Übergabe von einer Funkstation zur nächsten als auch Frequenzverschiebungen durch Dopplereffekte, die beide die Raten senken.

In Mikrozellen von ein- bis zweihundert Metern Durchmesser können Fußgänger und langsame Fahrzeuge bedient werden. Mikrozellen sollen in Innenstädten, Bahnhöfen und Flugplätzen Raten um 384 kbps liefern. Das reicht beispielsweise für viele Büroanwendungen, guten Internetzugang oder eine Videokonferenz mittlerer Bildqualität. Außerhalb der genannten Bereiche sinken die Datenraten für Autofahrer oder Zugreisende beträchtlich, in dünn besiedelten Landstrichen auf maximal 144 kbps.

Ob GPRS, HSCSD, EDGE oder UMTS von den Kunden bevorzugt werden, hängt von vielen Faktoren ab: etwa von der erreichbaren Datenrate und den Bedürfnissen der Nutzer, von der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Netze und nicht zuletzt von den Kostenmodellen der Betreiber. Ein Wermutstropfen aber bleibt in jedem Fall: In den USA und in China werden UMTS-Handys nicht funktionieren. Dort gelten eigene Standards. Wer häufig in diesen Ländern zu tun hat, benötigt mehrere Geräte. ■

Antonia Rötger hat Physik studiert und am CNRS in Grenoble promoviert. Heute lebt sie als freie Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

Stichwort: Standard UMTS

Ein Mobilfunk-Standard wie GSM oder UMTS ist ein umfangreiches Konvolut von Spezifikationen: für Frequenzen, Modulationsverfahren, Fehlerkorrekturen, Sicherheitsmerkmale, Datenübergabe beim Wechsel der Funkzellen oder auch Empfehlungen für die Konstruktion von Sendern und Endgeräten sowie die Einbindung verschiedenster Anwendungen. In derartige Standardisierungen gehen auch die Vorarbeiten und Empfehlungen anderer Organisationen mit ein, wie zum Beispiel von ETSI (European Telecommunications Standards Institute) oder der IETF (Internet Engineering Task Force).

Regierungen und Unternehmen koordinieren ihre Aktivitäten auf dem Kommunikationssektor in der ITU, der International Telecommunication Union, mit Sitz in Genf. Zur Zeit gibt es mehr als 2600 explizite ITU-Empfehlungen für Vereinheitlichungen auf dem Gebiet der Telekommunikation. Für den Mobilfunk hat die ITU unter dem Begriff IMT-2000 einen Rahmen entwickelt, in dem sich die verschiedenen Standards des Mobilfunks der 3. Generation (UMTS, cdma2000, TD-SCDMA) wieder finden.

Die Kunst bei der Ausarbeitung eines Standards ist es, auf der einen Seite die Technik so festzuschreiben, dass die Produkte verschiedener Hersteller später miteinander kompatibel sind, aber auf der anderen Seite so viel Freiheit zu lassen, dass der Wettbewerb um die besten Lösungen nicht behindert wird. Wie schwierig das ist, zeigt sich daran, dass der Standard für die nächste Mobilfunkgeneration bereits zu einem Zeitpunkt definiert wird, zu dem die aktuelle gerade startet. So begannen die Planungen zu IMT-2000 im Jahre 1992, als der erste digitale Mobilfunkstandard GSM seinen Betrieb aufnahm. Und zur Zeit ist es dasselbe: Das UMTS-Zeitalter hat noch nicht begonnen, da wird bereits die 4. Mobilfunk-Generation diskutiert.

Die Mega-Handys

Das Versprechen der grenzenlosen Datenfreiheit kann nur erfüllen, wer dazu geeignete Handys, Displays und Software auf den Markt bringt.

Von Rolf Sterbak

UMTS, das sei die Zukunft des Mobilfunks, prophezeien die Betreiber der Netze. Doch mit welchen Handys soll es der umworbene Kunde nutzen? „Zwar findet man in den Entwicklungslabors Designstudien und Prototypen aller Art, wohin aber die Reise geht, ist vielen Herstellern offenbar noch nicht klar", urteilt Uwe Baumgarten, Informatiker an der Technischen Universität München und am BMBF-Projekt „Community Online Services and Mobile Solutions" beteiligt. Nur eines ist sicher: Einen einzigen Typ von UMTS-Handy wird es nicht geben, sondern eher eine Vielzahl von Varianten, die auf unterschiedliche Bedürfnisse zugeschnitten sind.

Vor allem mit drei Problemen, so Baumgarten, hätten alle zu kämpfen: Die zu bewältigende Datenmenge, die Größe der Displays und der zwangsläufig wachsende Energiehunger der Geräte.

UMTS-fähige Handys, Notebooks und sonstige Endgeräte sollen nicht nur Internetseiten empfangen, sondern über eingebaute Kameras auch Bilder aufnehmen und verschicken können. Doch jede Sekunde eines digitalen Videofilms in VHS-Qualität verschlingt rund 64 Megabit. Selbst bei der im praktischen Einsatz kaum realisierbaren maximalen UMTS-Übertragungsrate von zwei Megabit pro Sekunde (Mbps) würde es Stunden dauern, bis sich alle Pixel auch nur zu einem kleinen Videoclip zusammengefunden hätten. Die Daten müssen deshalb komprimiert werden. Dazu gibt es bereits Techniken, die für den Versand über das Internet oder bei digitalen Camcordern eingesetzt werden. Für UMTS-Netze sollen sie weiterentwickelt werden.

Mit den Kompressionsverfahren nach den so genannten MPEG-Standards lassen sich Videodateien um den Faktor Hundert und mehr verkleinern, Audiodaten sogar um mehr als den Faktor 170. Beim Verdichten geht zwar Information verloren, doch machten sich die Entwickler der Verfahren zu Nutze, dass die Wahrnehmung des Menschen ihre Schwächen hat: Beispielsweise können Auge und Gehirn diagonale Muster in einem Bild schlechter erkennen als horizontale und vertikale. Also dürfen solche Strukturen gröber dargestellt werden, und die erforderliche Bitrate sinkt.

Aber auch das reicht nicht aus, wie Uwe Rauschenbach, Forscher bei Siemens in München, feststellt: „Große Bilder akzeptabel auf ein kleines Display zu bringen, das gleicht dem Problem, ein Kamel durchs Nadelöhr zu schieben."

Wie dies dennoch zu lösen ist, hat der promovierte Informatiker in Arbeiten beschrieben, für die er den Förderpreis der Mannesmann-Mobilfunk-Stiftung 2001 erhielt: „Das Bild wird nicht sofort komplett übertragen, sondern der Nutzer sucht zunächst aus einer gröberen Vorschau Regionen aus, die er detailliert sehen will." Die Auswahl erfolgt mit einem Stift auf dem berührungsempfindlichen Display. Die betreffenden Bereiche werden in hoher Qualität übertragen, erst dann – falls gewünscht – die übrigen Bildanteile. Aber auch der Autor, der das Bild ins Internet stellt, kann ihm wichtige Teile, die „Regions of Interest", festlegen und sie bevorzugt senden lassen. Ein solches Vorgehen unterstützt auch der vor kurzem verabschiedete Bilddaten-Standard JPEG 2000 (Spektrum der Wissenschaft 7/2001, S. 84). Rauschenbachs Lösungen zeichnen sich durch besonders kurze Übertragungszeiten aus. ▶



Die Fish-Eye-Technik ermöglicht, Stadtpläne auf einem Handy vernünftig darzustellen und zugleich Übertragungszeit zu sparen. Es werden nur die jeweils interessierenden Regionen geometrisch korrekt und in allen Details dargestellt, die weiter entfernten erscheinen verzerrt, sind aber noch erkennbar.

Der Wissenschaftsjournalist ***Rolf Sterbak*** *studierte Pädagogik. Er lebt in Hochdorf bei Plochingen am Neckar.*

Literaturhinweise

Bilddatenkompression. Von Tilo Strutz. Vieweg Braunschweig/Wiesbaden, 2000.

Einführung in die Informations- und Codierungstheorie. Von Hermann Rohling. Teubner, 1995.

Für Stadtpläne oder Landkarten eignet sich auch ein anderes Verfahren, um die Kosten für den Nutzer zu senken, eine Art Fish-Eye-Technik. Dazu wird ein Bild in viele Felder aufgeteilt, die perspektivisch verzerrt und mit geringer Auflösung auf dem Display erscheinen (siehe Bild S. 79). Wichtige Details sind trotzdem noch erkennbar. Durch Antippen eines entsprechenden Feldes öffnet sich eine rechteckige Lupe und der gewählte Bildausschnitt erscheint im Original, also unverzerrt. Interessieren darüber hinaus benachbarte Bereiche, lässt sich die Lupe dorthin verschieben. Der Vorteil: Nur die angewählten Bildbereiche werden aus dem Netz abgerufen und kosten Geld.

Aber selbst mit der raffiniertesten Übertragungstechnik wird der optische Eindruck deutlich geschmälert, wenn die Monitore, auf denen Videos, Karten und Web-Seiten dargestellt werden, die Größe von Briefmarken haben. Dem abzuhelfen versprechen alle Gerätehersteller, doch die Frage ist „Wie?“. Einige wollen auf die Tastatur verzichten, den gewonnenen Platz für ein größeres Display nutzen, in das bei Bedarf eine Tastatur eingeblendet wird, die mit Stift oder Fingerkuppe bedient wird. Solche Smartphones haben Nokia und Motorola auf der CeBIT 2001 vorgestellt. Ericsson geht mit dem flexiblen Bildschirm einen anderen Weg: Aus einem Gerätefach entrollt sich eine Art Kunststofffolie, auf die eine ganze Zeitungsseite passt. An solch biegsamen Displays oder elektronischem Papier mit submikrometerkleinen Kügelchen, die sich in einem elektrischen Feld orientieren, wird weltweit geforscht.



ERICSSON

Berührungsempfindliche Displays ersetzen die Tastatur und schaffen so Raum für den Monitor.

Dass es möglicherweise auch ganz ohne Bildschirm geht, beweist das Unternehmen Ericsson in einer anderen Studie. Eine Optik in dem nur etwa scheckkartengroßen Telefon projiziert Bilder und Texte im DIN A4-Format auf den Tisch oder ein Blatt Papier. Auf den ersten Blick eine charmante Idee. Doch ein solcher Bildwerfer könnte den Handy-Akku schneller in die Knie zwingen, als dem Nutzer lieb ist. Überhaupt werfen künftige Endgeräte immer größere Energieprobleme auf, warnt Uwe Baumgarten.

Denn mehr Leistung kostet auch mehr Strom. Energie sparende Monitore könnten vielleicht auf Kunststoff-Leuchtdioden basieren. Firmen wie Kodak, Osram und Pioneer arbeiten an organischen LEDs, die nicht nur farbig und mit hoher Leuchtkraft strahlen sollen, sondern bei Spannungen von unter fünf Volt auch nur sehr wenig Energie verbrauchen.

Auf der anderen Seite ersinnen Forscher neue Energiequellen für Mobilgeräte. So werden wieder aufladbare Batterien an die Bedingungen der Handys angepasst: Die Firma Varta hat zum Beispiel erste formbare und flache Polymer-Batterien entwickelt. Auch wird weltweit an nur wenige Zentimeter großen Mikro-Brennstoffzellen gearbeitet (Spektrum der Wissenschaft 7/2001, S. 48). Beispielsweise präsentierte das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg auf der diesjährigen Hannovermesse ein System von der Größe etwa einer Streichholzschachtel, das bereits zehn Watt bei einer Spannung von acht Volt bringt.

Für ein Handy wäre diese Brennstoffzelle freilich noch zu klobig und zu schwer. Das Fraunhofer-Gerät benötigt reinen Wasserstoff, der in Metallhydriden gespeichert wird. Die israelisch-amerikanische Firma Medis Technologies hält Patente für eine direkt mit Methanol zu betreibende Brennstoffzelle, deren Energiedichte schließlich ausreichen soll, um die Sprechzeit von Handys zu verzehnfachen und eine Stand-by-Zeit von mehr als zwanzig Tagen mit einer Brennstofffüllung zu erreichen. Diese Werte gelten jedoch für GSM-Handys – wie viel bei den künftigen UMTS-Energiefressern möglich ist, muss sich erst noch zeigen. ■



Auf diesem flexiblen, ausrollbaren Display soll der glückliche Besitzer sogar ganze Zeitungsseiten lesen können.

ERICSSON

Neue Hardware braucht das UMTS-Land

Nur ein kleiner Teil der vorhandenen Mobilfunknetze lässt sich für UMTS nutzen. Insbesondere die Basisstationen erfordern eine völlig neue Hardware.

Von Michael Lang

Die Zeit drängt: Bis 2003 muss das deutsche UMTS-Netz mindestens einem Viertel der Bevölkerung zugänglich sein, so wollen es die Lizenzverträge. Doch die vorhandene Infrastruktur des derzeitigen GSM-Netzes lässt sich dafür kaum nutzen, Antennen, Basisstationen und deren Steuerelektronik unterscheiden sich grundlegend. Nur das „Kernnetz“ aus zentralen Vermittlungsstellen und den Komponenten zur Anbindung an Festnetz und Internet lässt sich an UMTS anpassen.

Selbst wenn sich die Betreiber auf Großstädte konzentrieren, müssen sie für etliche Milliarden Mark Zehntausende neuer Basisstationen errichten. Dementsprechend wollen einige Unternehmen kooperieren und die neuen Stationen gemeinsam nutzen. Martin Kast, Solutions Manager von Ericsson, rechnet mit 30 bis 40 Prozent geringeren Investitionskosten.

An vorhandenen Standorten wird man wohl keine zusätzlichen Antennen aufstellen, sondern die für GSM durch Dual- oder Tripleband-Antennen ersetzen, also solchen, die auf zwei oder drei Frequenzen senden können (siehe Foto).

Basisstationen enthalten die Sende- und Empfangseinheiten sowie den Signalverstärker, sie sind über Koaxialkabel mit den Mobilfunkantennen verbunden und in deren unmittelbarer Nähe aufgestellt. Genügte zur Erweiterung von GSM auf GPRS noch ein einfaches Software-Update, so wird für UMTS eine komplett neue Basisstation benötigt, im Fachjargon als „Node B“ bezeichnet. Denn die Funktechnik ändert sich durch das so genannte CDMA-Verfahren, bei dem verschiedene Funkverbindungen durch Codes identifiziert werden. Node B extrahiert unter anderem die Sprachkanäle anhand dieser Codes.

Einen Fortschritt bietet UMTS auch hinsichtlich des Energieverbrauchs. Der in Node B integrierte Verstärker regelt die von der Antenne abgestrahlte Leistung zwischen einem Maximalwert von zwanzig Watt bei voller Auslastung bis zu lediglich ein oder zwei Watt bei Nulllast herunter. Eine GSM-Antenne des E-Netzes strahlt hingegen permanent zwanzig Watt ab. Ob UMTS aber den gefürchteten Elektrosmog wirklich reduziert, lässt sich noch nicht sagen. Denn die gestiegenen Ansprüche an Datenrate und Verbindungsqualität erfordern ein dichteres Netz als bei GSM mit wesentlich mehr, aber kleineren Zellen. In Bayern, wo 4000 neue Mobilfunkmasten in den nächsten Jahren aufgestellt werden, plant die Landesregierung deshalb an 200 Standorten entsprechende Vergleichsmessungen vor und nach dem Ausbau des UMTS-Netzes.

Die Steuerung mehrerer Basisstationen benötigt zudem eine andere Elektronik, so genannte „Radio Network Controller“ (RNC). Zu ihren Aufgaben gehört der „Seamless Handover“: „Die ▶



NOKIA

Basisstationen haben oft die Größe eines Kühlschranks und werden meist auf den Dächern direkt neben dem Mobilfunkmast mit den Antennen aufgestellt. Die hier abgebildete Station von Nokia ist laut Hersteller die weltweit erste „Triple-Mode“-Basisstation. Sie unterstützt GSM, GPRS/EDGE und UMTS.

RNC stellen sicher, dass beim Verlassen einer Funkzelle die Verbindung nahtlos von einer benachbarten Zelle übernommen wird“, sagt Andreas Varesi vom Netzausrüster Siemens. „Unsere RNC können jeweils bis zu 1024 Node B verwalten.“ Da in Großstädten der Abstand zwischen den Basisstationen zwischen 300 und 800 Metern schwankt, müsste in einer Stadt wie München nur ein solcher Controller aufgestellt werden. In der Regel kalkulieren die Netzbetreiber jedoch noch zwei Reservegeräte ein.

Schätzungen der Mobilfunkbetreiber gehen davon aus, dass das bestehende GSM-Netz parallel zu UMTS bis zum Jahr 2010 fortgeführt wird. An den Antennenstandorten werden deshalb sowohl die Basisstationen von beiden Standards nebeneinander stehen oder durch UMTS-Stationen mit eingebautem GSM-Modul ersetzt. Mit den frei werdenden GSM-Basisstationen wird parallel zum UMTS-Aufbau in den Städten der Ausbau des GSM-GPRS-Netzes auf dem Land vorangetrieben. ■

*Der Biologe **Michael Lang** arbeitete bis 2000 als Redakteur bei einer Computerzeitschrift, seitdem in der Wissenschaftsredaktion der Süddeutschen Zeitung sowie als freier Journalist. Lang bevorzugt Themen aus der Informations- und Telekommunikationstechnik sowie der Biologie.*

INTERVIEW

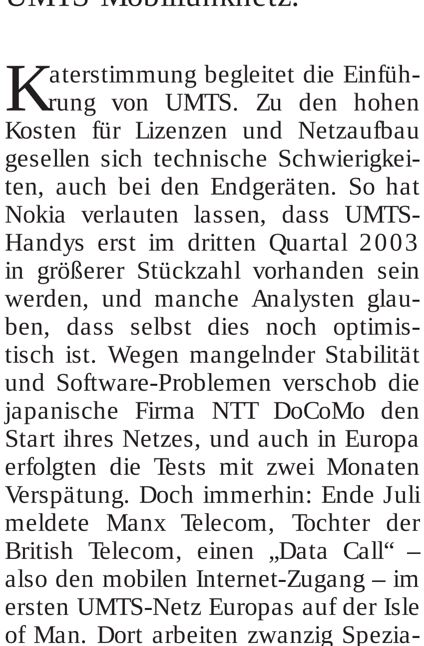
Besser spät als nie

Auf der Isle of Man startet das erste UMTS-Mobilfunknetz.



SIEMENS

Rudolf Siegert – der Siemens-Projektleiter auf der Isle of Man.



Katerstimmung begleitet die Einführung von UMTS. Zu den hohen Kosten für Lizenzen und Netzaufbau gesellen sich technische Schwierigkeiten, auch bei den Endgeräten. So hat Nokia verlauten lassen, dass UMTS-Handys erst im dritten Quartal 2003 in größerer Stückzahl vorhanden sein werden, und manche Analysten glauben, dass selbst dies noch optimistisch ist. Wegen mangelnder Stabilität und Software-Problemen verschob die japanische Firma NTT DoCoMo den Start ihres Netzes, und auch in Europa erfolgten die Tests mit zwei Monaten Verspätung. Doch immerhin: Ende Juli meldete Manx Telecom, Tochter der British Telecom, einen „Data Call“ – also den mobilen Internet-Zugang – im ersten UMTS-Netz Europas auf der Isle of Man. Dort arbeiten zwanzig Spezialisten von Siemens, der japanischen Firma NEC und Manx Telecom rund um die Uhr, um Funktürme und Basisstationen zu installieren, die Software zu testen und das Netz schließlich zum Laufen zu bringen. Zu den Zielen und Problemen befragte Spektrum der Wissenschaft den Siemens-Projektleiter Rudolf Siegert.

***Spektrum der Wissenschaft:** Warum wurde ausgerechnet die Isle of Man ausgewählt?*

Rudolf Siegert: Die Insel ist klein und überschaubar, ein Funknetz lässt sich hier leicht aufbauen. Außerdem ist sie politisch autonom und hat einen Sonderstatus in der Europäischen Union. Das ermöglichte der Regierung, sehr früh eine gebührenlose UMTS-Lizenz zu vergeben, ohne gegen EU-Wettbewerbsregeln zu verstoßen. Manx Telecom wollte seinerseits schnell Erfahrungen sammeln und die zugehörigen Dienste entwickeln.

***Spektrum:** Der Start des UMTS-Netzes war für Mai 2001 vorgesehen. Warum die Verschiebung?*

Siegert: Wir wollten im Mai mit der

ANWENDUNGEN I

Dringend gesucht: die Killer-Applikation

Nur wenn möglichst viele Kunden die neuen Dienste intensiv nutzen, machen sich die teuren Lizenzen bezahlt.

Von Kai Zöbelein

Schon vor der Versteigerung der deutschen UMTS-Lizenzen unkte die Hamburger Unternehmensberatung Mummert + Partner, mittelfristig könne der Privatverbraucher auch mit WAP und GPRS seine Bank- und Börsengeschäfte tätigen, seine Pizza bestellen und Staumeldungen erfahren. UMTS brauche er vorläufig nicht.

Dem widerspricht die zwölfte Auflage des Branchenreports „Technology Forecast 2001–2003“ der internationalen Unternehmensberatung PriceWaterhouseCoopers. Deren Experte für Mobile Business, Manfred Briede, sieht die Lage eher optimistisch: „Bedürfnisse beim Verbraucher zu wecken, das funktioniert im Mobilfunk wie auf anderen Märkten auch. Die Automobilindustrie bietet schnellere und komfortablere Fahrzeuge an, und der Kunde will sie haben. UMTS wird diverse Dienstleistungen schneller und komfortabler machen, und der Verbraucher wird gerne umsteigen.“

Die Entwicklung in benachbarten Technologiefeldern wie der Computer-Branche scheinen diese Einschätzung zu bestätigen, investieren PC-Nutzer doch immer wieder größere Summen, um mit neuer Hardware den wachsenden Software-Anforderungen zu genügen. Allerdings waren es dort bestimmte Anwendungen, die den Markt öffneten, insbesondere Spiele, Büro-Software und das World Wide Web. Welche „Killer-Applikation“ bietet UMTS?

Die Telecoms-Division der Marktforschungsgruppe Taylor Nelson Sofres veröffentlichte im Juni dieses Jahres eine Umfrage unter Handy-Nutzern in fast allen Ländern der Europäischen Union sowie Polen, der Slowakei, der Tschechischen Republik und den USA. Das Ergebnis: „Versenden und Empfangen von E-Mails“, „Verkehrsinformationen“ und „Aktuelle Nachrichten“ haben die besten Aussichten auf den begehrten Titel, Spiele dürften ein Nischendasein führen.

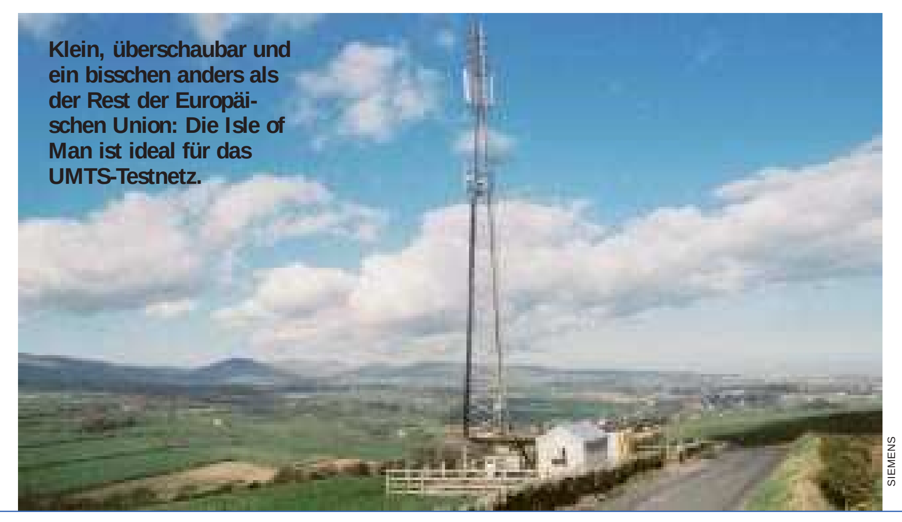
Welche Dienste im UMTS-Zeitalter eine besondere Rolle spielen werden, be-

Sprach- und Live-Bild-Übertragung starten, doch die Videoübertragung hat erst im Juni geklappt. Der limitierende Faktor sind aber immer noch die Endgeräte. Bisher hat sich noch kein Hersteller auf Auslieferungstermine festgelegt.

Spektrum: *Von wem stammen dann die Handys, die Sie für die Premiere nutzen?*
Siegert: Von NEC, es sind aber Vorserienmodelle, per Hand gefertigt.

Spektrum: *Ein deutsches, ein britisches und ein japanisches Unternehmen arbeiten Hand in Hand. Eigentlich sind Sie aber doch Konkurrenten, wie klappt die Zusammenarbeit?*
Siegert: NEC und Siemens entwickeln in einer ersten Phase die Infrastruktur, also Antennen, Basisstationen und Steuerelektronik gemeinsam. Der britische Partner übernimmt später das Netz und die Kundenbetreuung.

Spektrum: *Auf der Insel leben 75000 Menschen. Wie viele werden am Test teilnehmen?*
Siegert: Rund zweihundert.



Klein, überschaubar und ein bisschen anders als der Rest der Europäischen Union: Die Isle of Man ist ideal für das UMTS-Testnetz.

SIEMENS

Spektrum: *Welche Dienste werden Sie ihnen anbieten?*
Siegert: Beispielsweise ortsbezogene Services wie Restaurant-, Pub-, Hotel-Finder und einen virtuellen Fremdenführer. Oder auch das mobile Büro. Ein Angestellter schließt sein Notebook an das UMTS-Gerät an und greift von außerhalb auf Firmendaten zu. Er wird mit 384 Kilobit pro Sekunde Informationen empfangen, das ist um das 40-fache schneller als mit GSM-Handys. Auch Bank- und Börsengeschäfte sind damit möglich.

Spektrum: *Was wäre in der Endstufe die maximale Datenrate?*
Siegert: Für die Dauer des Tests bleiben wir bei diesen Leistungswerten, der Ausbau auf maximal zwei Megabit pro Sekunde ist nicht vorgesehen.

Spektrum: *Und was ist mit der viel gerühmten Videokonferenz?*
Siegert: Die lässt sich durchaus realisieren, wenn auch das Bild vielleicht ein bisschen ruckelt und nicht sehr fein aufgelöst sein wird.

Die Fragen stellte ***Evdoxia Tsakiridou****, promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in München.*

schäftigt auch die Wissenschaftler des Berliner Instituts für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), des Sekretariats für Zukunftsforschung (SFZ) und des Instituts Arbeit und Technik (IAT), die letzten beiden in Gelsenkirchen. Anhand von Online-Befragungen unter mehreren hundert kleinen und mittelständischen Content-Anbietern sowie Multimedia-Agenturen kamen sie ebenfalls zu dem Schluss: Eine einzige Killer-Applikation wird es nicht geben, wohl aber „Schlüsselapplikationen, die neue Dienstleistungen erschließen".



E-Mail, Nachrichten und aktuelle Verkehrsinformationen gehören vermutlich zu den „Killerapplikationen" des künftigen Mobilfunks.

NOKIA

So führe beispielsweise von den gängigen SMS-Nachrichten (Short Message Services, SMS) über die Verbindung mit Ton und Bildern (Enhanced Messages) der Weg zu mobilen Multimediadiensten, die über das Internet, aber auch unabhängig davon laufen können. Eine andere Schlüsselfunktion haben kleine Anwendungen, die nicht unbedingt hohe Umsätze generieren, aber von vielen Nutzern als unverzichtbar im Alltag empfunden werden, beispielsweise bestimmte Payment-Dienstleistungen, etwa das Bezahlen von Parkhausgebühren, Fahrkarten oder Ähnlichem via Handy. Innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahre sollten mobile Multimediadienste demzufolge langsam einen Markt finden. Dann wird eine breite Palette von Endgeräten, auch integriert in Fahrzeuge, Teil des Alltags werden. Übereinstimmend betonen die Wissenschaftler der drei Institute, dass es insbesondere darauf ankommen wird, nicht bloß konventionelle E-Commerce-Anwendungen aufs Handy zu übertragen, sondern dass auch die neuen Möglichkeiten der Mobilkommunikation – beispielsweise die Lokalisierung des Handytelefonierers (siehe den folgenden Beitrag) – genutzt werden.

„Vor den Privatkunden dürften allerdings Profis und Unternehmen UMTS nutzen, sofern es im Wettbewerb Vorteile bringt", ist Hansjürgen Paul vom IZT überzeugt. Firmen könnten mobilen Mit- ▶

Kai Zöbelein *studierte Politikwissenschaft, Geschichte und Wirtschaftspolitik, ehe er in Köln eine journalistische Ausbildung absolvierte. Heute lebt und arbeitet er in München.*

NOKIA



Lifestyle-Element Handy: Urlaubsgrüße werden vielleicht schon bald als E-Card elektronisch verschickt.

arbeitern einen Intranetzugang bieten. Außendienstmitarbeiter hätten dann im Kundengespräch direkten Zugriff auf wichtige Daten und könnten Verträge vor Ort online bearbeiten oder Produkte und Dienstleistungen bestellen.

Viel versprechend dürfte auch das gesamte Gebiet des so genannten Teleservice sein: Was bei Industrieanlagen heute schon möglich ist – Ferndiagnosen und -wartungen via Datenleitung –, könnte mit UMTS auch für andere Bereiche attraktiv werden. So ist es durchaus denkbar, Statusdaten von Automobilen an Wartungszentralen zu übertragen und den jeweiligen Zustand zu kontrollieren. Auch das Flottenmanagement großer Fuhrparks ließe sich effizienter gestalten. Gewinnen die Netzbetreiber erst einmal die Geschäftswelt, so werden wachsende Nutzerzahlen die Kosten senken, bis sich der Massenmarkt öffnet. Entscheidend dürfte sein, mit welchen Preiskonditionen die Anbieter auf den Markt gehen. Teure Endgeräte und eine hohe monatliche Grundgebühr schrecken ebenso ab wie hohe laufende Kosten. Vorreiter könnten vor allem Jugendliche sein, wie schon beim derzeitigen Mobilfunk. UMTS, sagt Karlheinz Steinmüller vom SFZ, könnte für sie ein Lifestyle-Element werden, integraler Bestandteil einer Always-On-Kommunikationskultur. ■

ANWENDUNGEN II

Peilstation in der Westentasche

Von der Lokalisierung eines Unfalls bis zur Restaurantempfehlung – Handy-Ortung soll es möglich machen.

Von Dörte Otten

Unfall mit Schwerverletzten, schicken Sie Feuerwehr und Notarzt!" Ein Notruf per Handy kann Leben retten. Um die Helfer gezielt zum Unfallort zu lenken, sollen die Mobilfunkbetreiber in den USA ab diesem Monat ihre Kunden auf 125 Meter genau orten können. Europäische Gesetzgeber dürften in den kommenden Jahren vergleichbare Auflagen erlassen.

Not- und Pannenhilfe sind die eine Seite der Medaille „Handy-Ortung", auf der anderen stehen jede Menge nützliche „lokale und personalisierte Dienste". Wo finde ich in meiner Nähe einen Schallplattenladen? Wo ein gutes China-Restaurant, einen Friseur? Wie entwickelt sich das Wetter an meinem momentanen Aufenthaltsort? Und natürlich: Wie komme ich um den Stau herum, vor dem mich mein Handy gerade gewarnt hat? Zu solchen praktischen Hinweisen kommt der Nutzen etwa für Logistikunternehmen, die jederzeit die Handys ihrer Fahrer und damit deren Standort lokalisieren können.



Manches kann schon der derzeitige Funkstandard GSM: Anhand der Kennung der Basisstation, die das Handy-Signal weiterreicht, der „Cell-ID", ermittelt beispielsweise Viag Interkom die Position des Besitzers mit einer Genauigkeit, die der Maschenweite des Netzes entspricht. In Ballungsräumen stehen die Stationen in Abständen von etwa 300 Metern, in ländlichen Gebieten sind es bis zu 35 Kilometer.

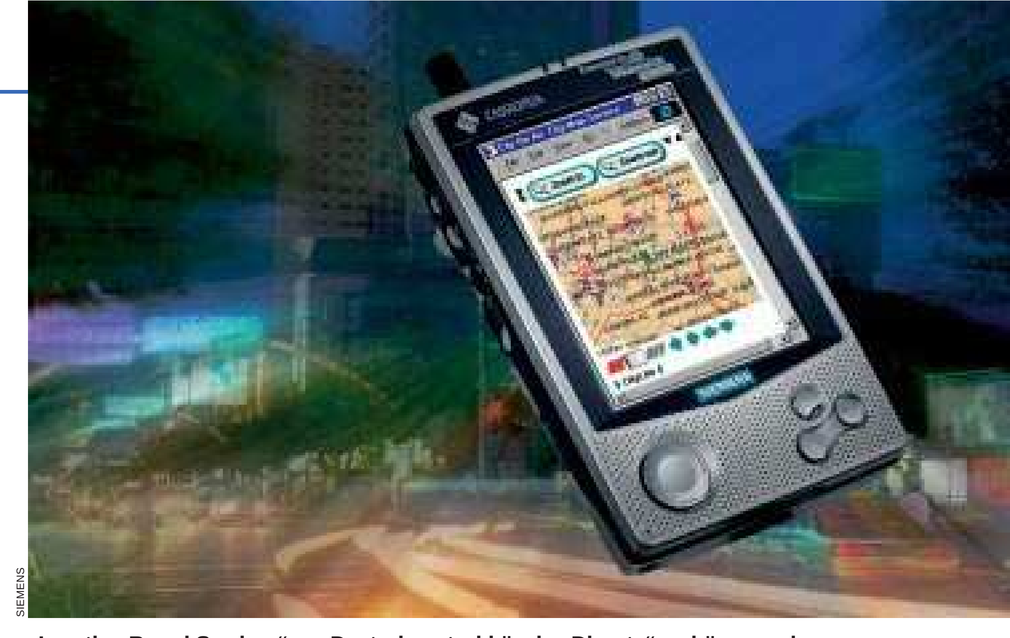
Das sind aber nur Best-Case-Werte für die Ortung, denn es kommt durchaus vor, dass ein Mobiltelefon beispielsweise aufgrund von Abschattungen oder Reflexionen der Signale nicht von der nächstliegenden Antenne versorgt wird. Das künftige engere Netz der UMTS-Antennen wird die Genauigkeit zwangsläufig verbessern, insbesondere wenn das Handy in Innenstädten mit bis zu sechs Basisstationen Kontakt aufnimmt – die Position ergibt sich dann aus dem Schnittpunkt der Versorgungsgebiete; Techniker sprechen von der „Enhanced Cell-ID". Die höhere Bandbreite der UMTS-Signale – fünf Megahertz gegenüber 200 Kilohertz bei GSM – ermöglicht ebenfalls eine genauere Ortung. Je größer die Bandbreite, desto schärfer ist nämlich der Anstieg der Signale und desto weniger ▶

werden sie durch das überlagerte Rauschen verschmiert. Im Idealfall gelingt so eine Lokalisierung auf wenige Meter genau.

Weil bei UMTS größere Datenpakete schnell transferiert werden können, lassen sich aber noch anspruchsvollere Verfahren mit höherem Datenaufwand zur Positionierung einsetzen. Beispielsweise kann man aus der Laufzeit der Signale auf den Abstand zwischen Sender und Empfänger schließen. Die Genauigkeit, mit der die Laufzeit bestimmt werden muss, ist allerdings erheblich: Zehn Meter Ortsunterschied entsprechen 30 Nanosekunden Laufzeitdifferenz. Auch der Abfall der Signalamplitude lässt Rückschlüsse zu, etwa nach der Faustformel „Je länger die Signale unterwegs sind, desto stärker werden sie gedämpft".

Doch jedes Objekt in der Nähe des Telefons verfälscht sie bereits, inklusive dem Nutzer selbst. Deshalb müssten zumindest mehrere Messungen gemittelt werden. Die erreichbare Genauigkeit liegt dabei bei bestenfalls 70 Metern. Schließlich wäre es auch möglich, über Richtantennen die Ankunftswinkel der Datenpakete von verschiedenen Sendern zu verwenden und über Triangulation seinen Ort zu bestimmen. Doch bei allen drei Verfahren stören Wettereinflüsse und Reflexionen, verlässliche Werte gibt es nur bei freier Sicht auf mehrere Sender.

Zum Glück steht die Abhilfe schon parat: Eine als „Enhanced Observed Time Difference" (E-OTD) bezeichnete Methode misst nicht die Laufzeit, sondern die Laufzeitdifferenzen der Signale von mindestens drei Basisstationen; das Mobiltelefon muss dazu zwar technisch aufgerüstet, aber nicht aufwändig mit diesen Stationen synchronisiert werden. Denn die Gangunterschiede der Senderuhren werden durch zusätzliche Eichstationen korrigiert, die sich in bekannten Abständen von den Sendern befinden. Sie messen den Gangunterschied der Senderuhren. Damit kann ein Zentralrechner die vom Handy gemeldeten Zeitdifferenzen korrigieren.


SIEMENS

„Location Based Services", zu Deutsch „ortsabhängige Dienste", gehören zu den attraktivsten Angeboten im UMTS-Netz. Ist die Position eines Handynutzers auf wenige Meter genau bekannt, ist es ein Leichtes, ihm das nächste Restaurant oder die nächste Tankstelle durchzugeben – oder wo er hätte abbiegen müssen.

Auf diese Weise lässt sich der Standort im UMTS-Netz auf 20 Meter genau eruieren. Damit immer Kontakt zu mehreren Sendern besteht, müssen die Netzbetreiber aber in die Infrastruktur investieren. „Das Netz der Basisstationen muss etwa um den Faktor Drei feinmaschiger werden", erklärt Prof. Bernd Eissfeller von der Universität der Bundeswehr in München, „das kostet hier zu Lande pro UMTS-Netz etwa zwei bis vier Milliarden Euro. Zusätzlich brauchen wir rund 7000 Eichstationen, gleich 50 bis 70 Millionen Euro".

Eine Alternative bietet die Kopplung mit dem Global Positioning System (GPS). Seit letztem Jahr stehen die Signale der zugehörigen amerikanischen Satelliten auch dem zivilen Nutzer weltweit unkodiert und zum Nulltarif zur Verfügung. GPS bietet eine Ortung auf etwa zehn Meter genau, vorausgesetzt auf mindestens drei der 24 Satelliten ist die Sicht frei. Mobile GPS-Receiver können aus den Laufzeiten der Satellitensignale ihre Position berechnen, was aber Minuten dauert und energieintensiv ist. Praktikabler ist das „Assisted GPS", bei dem fest installierte GPS-Receiver die Gangunterschiede der Satellitenuhren und atmosphärische Einflüsse korrigieren.

Dörte Otten *ist promovierte Biophysikerin und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin und Fachlektorin in München.*

Das erste GSM-Handy mit eingebautem GPS-Chip brachte kürzlich die finnische Firma Benefon auf den europäischen Markt. Kaum größer als ein herkömmliches Mobiltelefon kann es dem Outdoor-Freak jederzeit die Position nennen und dank eingespeicherter Landkarten den Weg weisen. Sollte er dennoch verloren gehen, sendet es auf Knopfdruck ein „SOS" mit Angabe der Position. Europa plant derzeit ein eigenes, zivil kontrolliertes Navigationssystem namens GALILEO.

„Auf lange Sicht werden die Netzbetreiber die drei standardisierten Verfahren Cell-ID, E-OTD und Assisted GPS miteinander kombinieren", prognostiziert Stefan Kühn, Product Manager bei Siemens. Zunächst wird es allerdings wohl nur die erstgenannte Technik für jedermann geben. Der große Aufwand für eine Weiterentwicklung wird sich erst dann lohnen, wenn genügend Kunden für die neue Welt des Findens – und Gefunden-Werdens – zu begeistern sind. ■



NOKIA

Immer bereit – Tagesplan und Nützliches auf einen Blick

UMTS+ +

In den Forschungslabors reifen bereits Verfahren für kommende Mobilfunkstandards.

Von Ulrich Eberl

Sprungbrett in die Multimedia-Welt oder Fehlstart? Das neue Mobilfunksystem UMTS wird heiß diskutiert: Es sei mit viel zu hohen Lizenzgebühren belastet, sagen die Kritiker, und könne in vielen Fällen nicht mehr als doppelte ISDN-Geschwindigkeit erreichen (128 Kilobit pro Sekunde, kbps). Das wäre zwar zehnmal mehr als heutige GSM-Handys leisten, aber weit weniger als für eine Videokonferenz oder das mobile Büro notwendig wäre (siehe Abbildung auf Seite 76).

Kaum beachtet von den Medien arbeiten jedoch Wissenschaftler und Techniker daran, diese Schwächen von UMTS zu beheben und zugleich den Standard der vierten Mobilfunkgeneration vorzubereiten. Bis zu 54 Megabit pro Sekunde (Mbps) sollen dann in Funknetzen reisen, das wäre eine 500- bis 1000-mal höhere Datenrate als mit ISDN. Die Übertragung einer fünf Megabyte großen Powerpoint-Präsentation von der Firma aufs Notebook beim Kunden wäre damit in weniger als einer Sekunde erledigt.

Das verfügbare Frequenzspektrum ist die wertvollste und knappste Ressource der Telekommunikationsfirmen. Schließlich haben sie allein in Deutschland fast 100 Milliarden Mark für 150 Megahertz (MHz) bezahlt. Die Frequenzen besser zu nutzen ist also bares Geld wert. So braucht das heutige GSM-Netz noch drei bis fünf Hertz an Bandbreite (Differenz zwischen der höchsten und niedrigsten übertragenen Frequenz), um ein Bit pro Sekunde zu übermitteln (0,2 – 0,3 bps/Hz). UMTS soll dies bereits mit einem Hertz erreichen (1 bps/Hz) und die effizientesten Verfahren in den Forschungslabors schaffen sogar schon 30 bps/Hz.

„Der Trick dabei ist, mehr von der Energie zu empfangen, die ein Sender abstrahlt. Dadurch verbessert sich das Verhältnis von Signal und Hintergrundrauschen und damit wiederum wächst die erreichbare Datenrate“, erklärt Werner Wiesbeck, Leiter des Instituts für Höchstfrequenztechnik und Elektronik der Universität Karlsruhe und Koordinator von „HyEff“, einem von mehreren nationalen wie auch europäischen Forschungsprojekten mit einem gemeinsamen Ziel: die Mobilkommunikation leistungsfähiger zu machen.

Dazu müssen die Wissenschaftler lernen, das Problem der Mehrwegeausbreitung besser zu beherrschen. „In dicht bebauten Gebieten wird ein Signal immer wieder reflektiert, gebeugt und gebrochen, bevor es den Empfänger erreicht“, erklärt Wiesbeck. „Dieselbe Information kommt also auf einigen hundert Wegen beim Empfänger an. Bisher wird einfach eine dieser Funkwellen herausgefiltert und verstärkt. Das muss aber nicht die optimale sein.“



Dem lässt sich in einem Fahrzeug besonders leicht abhelfen: Man baut einige räumlich getrennte Empfangsantennen ein, schaltet sehr schnell zwischen ihnen hin und her und verwendet dann das stärkste der empfangenen Signale. Doch auch mit einem normalen Handy lässt sich so etwas realisieren, wobei hier aber Antennen gewählt werden, die die einlaufenden Signale nicht nach Laufzeiten, sondern nach ihren Polarisationen separieren – also nach den Schwingungsrichtungen der elektromagnetischen Wellen.

Das SDMA-Verfahren (Space Division Multiple Access) wählt einen anderen Trick. Hier werden im Sender mehrere Antennenelemente in ihrer Phase und Amplitude so angesteuert, dass bei der Überlagerung der abgestrahlten Signale die Energie in Richtung Empfänger gebündelt wird; man spricht auch von „Intelligenten Antennen“ (Spektrum der Wissenschaft 9/2000, S. 87). Damit kann dieselbe Frequenz in einer Funkzelle mehrfach genutzt werden – nur eben in unterschiedlichen Richtungen. Bis zu 5 bps/Hz sind so zu erreichen. Noch effizienter sind MIMO-Systeme (Multiple Input Multiple Output), die sowohl auf Sender- wie auf Empfängerseite mehrere Antennen nutzen. Bei je vier erreicht ein solches System Verbesserungen um den Faktor 16: „Hier werden im Moment Werte zwischen 8 und 30 bps/Hz gehandelt“, versichert Wiesbeck. Alle diese Verfahren ließen sich auch schon in GSM integrieren.

Ein weiteres Problem der UMTS-Mobilfunk-Welt ist, dass die Bewegung von Funkzelle zu Funkzelle den Datendurchsatz reduziert, denn die Signale müssen ständig weitergereicht werden, und das ist aufwändig und kostet Zeit. Hinzu kommt schlichte Physik in Gestalt des Dopplereffekts: Bewegen sich Sender und Handy relativ zueinander, verschieben sich die Frequenzen in den übertragenen Wellenpaketen, und zwar unter Umständen so stark, dass die Informationen nicht mehr korrekt interpretiert werden können. Darum kann die UMTS-Maximalrate von zwei Megabit pro Sekunde nur genießen, wer stationär statt mobil neben einem Sender steht und zudem als Einziger die Funkzelle nutzt. Im Stadtverkehr reduzieren sich die erreichbaren Raten auf 384 kbps oder weniger, und auf der Autobahn kann ein UMTS-Kunde froh sein, wenn er noch ISDN-Geschwindigkeit erhält.

Doch auch hier ist Rettung in Sicht, zumindest für die vierte Generation des Mobilfunks: das ursprünglich für den Digitalen Rundfunk und das Digitalfernsehen entwickelte OFDM-Verfahren (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), auch Multi-Carrier-CDMA genannt. Dort werden die Informationen nicht nur auf einem Kanal übertragen, sondern auf viele – beispielsweise 512 – ▶



HERMANN / STARKE / CORBIS STOCK MARKET

Wie werden unsere Enkel telefonieren?

nebeneinander liegende Trägerfrequenzen verteilt und parallel verschickt. Die Frequenzen und die Verschachtelung der Informationen werden so gewählt, dass Echos und Überlagerungen nur minimale Auswirkungen haben. Besonders störanfällige Frequenzen lassen sich ganz ausblenden. Auch der Dopplereffekt spielt kaum eine Rolle, da nur schmale Frequenzbänder übermittelt werden. Die Dopplerverschiebung an den Enden dieser Frequenzbänder ist wesentlich geringer, als wenn ein einziges breites Band übertragen wird. „10 Mbps und mehr ins fahrende Auto zu übertragen ist damit kein Problem", sagt Werner Wiesbeck.

Zweifler mögen nur einen Blick auf das Digitalfernsehen werfen: Da funktioniert die Live-Videoübertragung auch noch im ICE und sogar bei 400 Kilometer pro Stunde. „Diese OFDM-Lösung lässt sich zusätzlich mit den Intelligenten Antennen kombinieren, und man hätte sie auch schon in den UMTS-Standard integrieren können." Allerdings, so schränkt der Fachmann ein, müssen mehrere hundert Frequenzkanäle gleichzeitig verarbeitet werden, und das kann erst die nächste Generation von Mikrochips bewältigen.

Ein fast ketzerisches Konzept verfolgt Professor Bernhard Walke, Inhaber des Lehrstuhls für Kommunikationsnetze an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen und Leiter eines der größten Forschungsteams für Multimedia-Mobilkommunikation in Deutschland: „Wenn Sie am Kiosk Spektrum der Wissenschaft kaufen, klauben Sie nicht Buchstabe für Buchstabe zusammen, sondern kaufen das Magazin am Stück und gehen weiter." Auch beim Mobilfunk brauche der Nutzer nur in sehr wenigen Fällen wie beim Telefonieren Kommunikation in Echtzeit. Das Versenden von E-Mail oder das Herunterladen großer Dateien könne also auch verzögert erfolgen. Und das geht nach Ansicht Walkes mit anderen Verfahren besser als mit UMTS. Er möchte in Städten Sender eines drahtlosen lokalen Funknetzes (Wireless Local Area Network, W-LAN) verteilen, die über Glasfaserleitungen mit einem Festnetz verbunden sind. Selbst an den Pfosten von Verkehrszeichen ließen sie sich unterbringen. „Immer wenn Sie an einer Ampel stehen bleiben, erhält Ihr Handy oder Notebook oder was auch immer Sie benutzen in Sekundenbruchteilen die zuvor angeforderten Daten. Nur die Echtzeit-Kommunikation läuft dann noch über UMTS oder GSM."

Die ersten W-LAN-Netze gibt es bereits: So wurde von dem schweizerischen Start-up-Unternehmen Monzoon Networks gerade ein 11-Mbps-Funknetz entlang des Zürich-Sees in Betrieb genommen, das demnächst auch an Flughäfen in ganz Europa installiert werden soll. In manchen Hotels und Universitäten stehen derartige Netze ebenfalls zur Verfügung, und das EU-Projekt MIND untersucht solche Systeme für den drahtlosen breitbandigen Internet-Zugang. Technisch stehen dahinter bereits definierte Standards wie IEEE 802.11 und HIPERLAN/2 (High Performance Radio LAN). „Insbesondere HIPERLAN/2 ist sehr vielversprechend", sagt Walke. „Man hat eine garantierte Dienstgüte, also festgelegte Parameter wie Durchsatz, Verzögerung oder Verfügbarkeit, und außerdem erreicht dieses Verfahren Datenraten bis 54 Mbps."

Der Empfänger benötigt nur eine entsprechende Steckkarte, und auch auf Senderseite passt die HIPERLAN/2-Basisstation in ein Kästchen der Größe einer halben Zigarrenschachtel – die Sendeleistung ist nur ein Bruchteil der von heutigen Mobilfunksendern. HIPERLAN/2 und IEEE 802.11 senden im Spektrum zwischen fünf und sechs Gigahertz, ein Bereich, der überall auf der Welt lizenzfrei ist. Der einzige Nachteil dieser W-LAN ist zugleich ein Vorteil: Die Ausbreitung der Signale erfolgt „quasi-optisch", das heißt, sie wird durch Mauern oder Büsche stark behindert: In Städten liegt daher die Reichweite unter 30 Metern (bei 54 Mbps). „Das bedeutet aber auch, dass es nicht viele Nutzer pro Zelle geben wird, sodass jeder Einzelne eine sehr hohe Datenrate für sich beanspruchen kann."

Für die Signalweiterleitung von Zelle zu Zelle möchte der Netzwerkspezialist auf ein „Multi-Hop"-Verfahren zurückgreifen: Die einzelnen Stationen geben die Signale so lange weiter, bis sie an einer Basisstation mit Glasfaseranschluss angelangt sind. Auf diese Weise brauchen nur wenige W-LAN-Basisstationen den teuren Glasfaseranschluss, den anderen reicht ein Stromkabel.

Derartige selbst organisierte Verfahren werden unter dem Stichwort „Ad-hoc-Netze" auch für andere künftige Mobilfunksysteme diskutiert. So könnte beispielsweise auch jedes Mobiltelefon als Quasi-Basisstation dienen und die Signale anderer Handys weiterleiten. Doch wie sich ein solches Ad-hoc-Netz selbst organisiert, die Vergütung für die Weiterleitung funktioniert, die Sicherheit am besten gewährleistet und Elektrosmog vermieden wird, sind derzeit heiße Forschungsthemen. ■

Der promovierte Physiker ***Ulrich Eberl*** *arbeitet als Wissenschaftsjournalist in München. Seit 1996 zeichnet er zudem für die Technologiekommunikation der Siemens AG verantwortlich.*

Literaturhinweise

Mobilfunknetze und ihre Protokolle. Von Bernhard Walke. B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, 3. Auflage 2001.

UMTS – Ein Kurs. Von Bernhard Walke, Marc Althoff und Peter Seidenberg. Schlembach Verlag, Weil der Stadt, 2001.

BioTech-Region München

Mehr als 130 Pharma- und Biotechnologie-Firmen gibt es im Umkreis von München, vor allem in Martinsried, darunter die Morphosys AG und Startups wie die hier vorgestellten Unternehmen Axxima und EleGene. Diese dynamische Entwicklung verdankt die Region einem hochklassigen wissenschaftlichen Umfeld.

Axxima Pharmaceuticals AG

„Firewalls“ gegen Viren und Bakterien

Das Aids-Virus manipuliert Signalwege in der Zelle zu seinen Gunsten. Ein neuer Wirkstoff soll dies verhindern.

TOMO NARASHIMA

Fieberhaft sucht die Pharmaindustrie nach neuen Wirkstoffen gegen Infektionskrankheiten. Denn immer häufiger erweisen sich Erreger gegen Antibiotika und antivirale Medikamente als resistent. Selbst neu auf den Markt gebrachte Pharmaka verlieren mitunter schon nach wenigen Monaten ihre Wirkung. Fatale Konsequenz: Die Zahl tödlich verlaufender Infektionen nimmt weltweit wieder zu. Das Martinsrieder Biotech-Unternehmen Axxima Pharmaceuticals AG hat deshalb eine völlig neue Strategie entwickelt: Ein molekulares Schutzschild, die so genannte „Signal Transduction Firewall“, soll verhindern, dass sich Bakterien und Viren in den zellulären Informationsfluss einschalten.

Denn solch ein Krankheitserreger vermehrt sich, indem er die komplizierte Signalkette der Wirtszelle derart manipuliert, dass sie verstärkt bestimmte für ihn notwendige Proteine herstellt und/oder aktiviert. Axxima erforscht derartig veränderte Übertragungswege und sucht sie medikamentös zu blockieren. In vielen Fällen lassen sich nämlich an der Signalübertragung beteiligte Moleküle hemmen, ohne der Zelle zu schaden – sie kann auf andere Signalträger ausweichen. Der große Vorteil dieser Strategie: Resistenzen entwickeln sich nur langsam. Herkömmliche Medikamente blockieren von Bakterien und Viren selbst hergestellte Proteine. Weil die Erreger aber mit hoher Rate mutieren und dabei Gestalt und Aktivität häufig verändern, entstehen gegen diese Medikamente resistente Stämme. Bei der Blockade menschlicher Eiweiße müssen Bakterien und Viren eine völlig neue Überlebens- und Vermehrungsstrategie in der Wirtszelle entwickeln.

Als viel versprechende Molekülklasse für eine gezielte Unterbrechung der Interaktion zwischen Erreger und Molekülen der zellulären Signalübertragung hat das Unternehmen hauptsächlich phosphatübertragende Enzyme, so genannte Proteinkinasen identifiziert. Um die am besten geeigneten Vertreter aufzuspüren, hat Axxima eine Methode entwickelt, bei der sämtliche menschliche Kinasen gesunder Zellen mit denen infizierter Zellen verglichen werden. Von Interesse sind dabei diejenigen Enzyme, deren Aktivität durch den Erreger erhöht wurde. Diese lassen sich mit Hilfe von labortechnischen Verfahren und Software-Systemen herausfinden und beurteilen.

Im Fokus stehen die Viruserkrankungen Aids, Hepatitis B und Hepatitis C, durch Cytomegalie-Viren verursachte Erkrankungen bei Transplantatempfängern, Grippe (Influenza) sowie die bakterielle Tuberkulose. Bei HIV-infizierten Zellen zum Beispiel entpuppte sich eine zelluläre Proteinkinase als geeignetes Zielmolekül für die medikamentöse Blockierung. Nachdem Axxima jedoch eine Reihe von Hemmstoffen in den Martinsrieder Labors umfangreich getestet und den Wirkmechanismus aufgeklärt hatte, stießen die Forscher auf ein noch besser geeignetes Zielmolekül, ein zelluläres Transportprotein, dessen Funktion die Ausfuhr bestimmter Erbinformationen aus dem Zellkern ist. Hat sich ein Mensch mit HIV infiziert, so dringt das Virus in die Zelle ein, gibt seine Erbinformation frei, die dann in den Zellkern transportiert und dort in die zelleigene Erbinformation eingebaut wird. Zur Produktion von neuen Viruspartikeln muss ▶

Das Unternehmen im Profil

Die Axxima Pharmaceuticals AG wurde 1997 von Dr. Axel Ullrich, dem Direktor der Abteilung Molekularbiologie des Max-Planck-Instituts (MPI) für Biochemie, und Dr. Heinrich Kuhn, dem ehemaligen Geschäftsführer der Garching Innovation GmbH, gegründet. Am Hauptsitz in Martinsried bei München sowie in der Tochterfirma ViChem in Budapest sind über sechzig Mitarbeiter beschäftigt. Ende 2003 will das Unternehmen drei Substanzen in klinischen und fünf Substanzen in präklinischen Tests prüfen. Ein Börsengang ist nicht vor diesem Zeitpunkt vorgesehen.

die virale Erbinformation (RNA) im Kern vermehrt und anschließend ins Zellplasma transportiert werden. Dort werden Virusproteine hergestellt und die neuen Viruspartikel zusammengebaut, die anschließend die Zelle verlassen.

Zum Export der viralen Erbinformation aus dem Kern benötigt das Virus sehr viele zelleigene Transportproteine und regt dementsprechend deren Produktion im Zellplasma an. Axxima arbeitet mit einer Substanz namens AXD-455, die verhindern soll, dass die Transportproteine in den Zellkern gelangen – die RNA wird dann nicht mehr ins Zellplasma verfrachtet und die Vermehrung ist gestoppt. AXD-455 blockiert ein spezifisches Protein, das die Transportproteine mit einer Art Passierschein versieht, der die Poren der Kernhülle veranlasst, die Moleküle durchzulassen.

Seit Juni dieses Jahres wird AXD-455, das die Vermehrung aller bisher bekannten resistenten HIV-Stämme hemmen kann, in klinischen Studien auf Sicherheit und Wirksamkeit getestet. Anfang 2003 will Axxima auch bei Substanzen gegen die durch Cytomegalie-Viren verursachten Infektionskrankheiten sowie Tuberkulose mit klinischen Studien beginnen.



AXXIMA

Schöner forschen: Axxima verfolgt eine neue Strategie gegen Viren und Bakterien.

EleGene AG

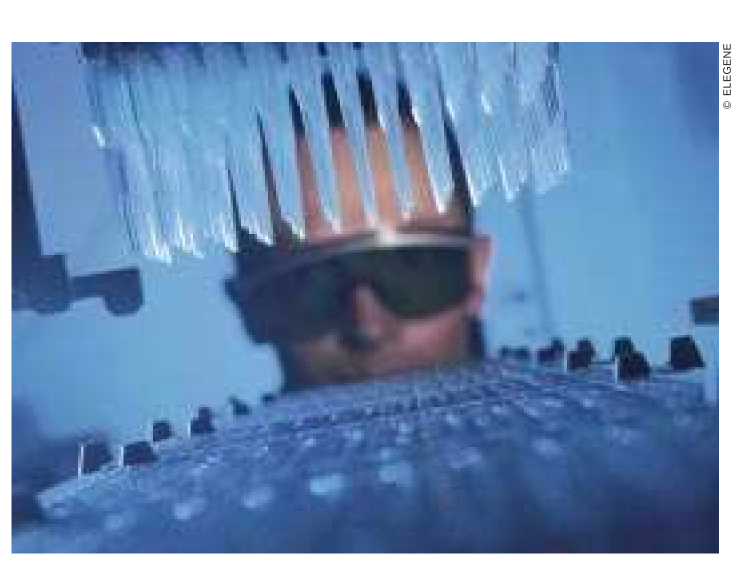
Auf den Wurm gekommen

Etwa 500 Gene des Menschen konnten bislang identifiziert werden, die bei verändertem Bauplan Krankheiten auslösen. Rund zwei Drittel von ihnen gehören auch zur genetischen Ausstattung des knapp einen Millimeter großen Fadenwurms *Caenorhabditis elegans*, kurz *C. elegans*. Das macht dieses Tier zum idealen Modell in der Erforschung von Krankheiten und der Entwicklung entsprechender Medikamente. Das von den Molekularbiologen Dr. Karlheinz Tovar und Prof. Ralf Baumeister im Februar 1999 gegründete Unternehmen EleGene in Martinsried hat Verfahren der Ludwig-Maximilians-Universität München weiterentwickelt, mit denen die Wurmgene gezielt manipuliert werden können. Innerhalb von wenigen Wochen entstehen Mutanten, die sich als Tiermodell für Alzheimer, Parkinson, Muskeldystrophie, Gefäß- und Krebserkrankungen eignen.

Mit einer eigens zusammengestellten chemischen Substanzbibliothek und modernen Durchmusterungsverfahren werden daran mögliche Wirksubstanzen getestet. Dabei genügen wenige Mikrogramm der oftmals sehr teuren und aufwändig hergestellten Mittel. Anderen Versuchstieren wie Mäusen hingegen müssen Milligramm-Mengen verabreicht werden. Das ist nicht nur kostenintensiv, sondern oftmals auch unmöglich, wenn diese Mengen schlichtweg noch nicht verfügbar sind. Zudem ist *C. elegans* einfach zu halten – eine handtellergroße Petrischale mit Nährgel genügt für hunderttausende Individuen.

Das Unternehmen im Profil

EleGene beschäftigt rund vierzig Mitarbeiter und pflegt eine Vielzahl von Kooperationen mit Universitäten, Forschungsinstituten und der Pharmaindustrie. Für ihre Wurmforschung wurden die Firmengründer Karlheinz Tovar und Ralf Baumeister mit dem diesjährigen Philip-Morris-Forschungspreis ausgezeichnet.



© ELEGENE

In speziellen Roboterstraßen werden Substanzen auf ihre Eignung als Wirkstoff getestet.

Die Autorin **Ulrike Zechbauer** *arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in München. Links zu den Unternehmen finden Sie bei* **www.spektrum.de** *unter „Aktuelles Heft“.*

100 JAHRE NOBELPREIS

Physik-Nobelpreise – rein biografisch betrachtet

Eine Analyse der Lebenswege von Nobelpreisträgern im Fach Physik gibt interessante Aufschlüsse über strukturelle und forschungspolitische Zusammenhänge in der Wissenschaft.

Von Claus D. Hillebrand

Vor 100 Jahren wurden zum ersten Mal die Nobelpreise in den Kategorien Physik, Chemie, Physiologie oder Medizin, Literatur sowie Erhaltung des Friedens verliehen. Der von dem schwedischen Chemiker und Industriellen Alfred Nobel (1833–1896) durch eine testamentarische Verfügung begründete Preis stellt die weltweit bekannteste und renommierteste wissenschaftlich-kulturelle Anerkennung dar. Geehrt werden Personen, deren Entdeckungen, Werke oder Errungenschaften „den wichtigsten Beitrag" für ihre jeweilige Disziplin geleistet haben.

Demzufolge erwartet die wissenschaftliche Welt alljährlich mit Spannung die Bekanntgabe der neuen Preisträger, die stets im Oktober erfolgt. Für die Auserwählten bedeutet die Preisvergabe die Krönung ihrer wissenschaftlichen Karriere; für die Institutionen, an denen sie tätig sind, kommt die Ehrung einem Gütesiegel gleich. Folglich dient die Vergabe der Nobelpreise in der forschungspolitischen Diskussion immer wieder als Maß für die Qualität der Bildungs- und Forschungssysteme eines Landes.

In diesem Zusammenhang ist es interessant, sich mit den Biografien der Nobelpreisträger auseinander zu setzen. Für eine quantitative Analyse ist ein Datensatz erforderlich, der möglichst umfassend den Ausbildungs- und Werdegang der Laureaten charakterisiert. Eine statistische und inhaltliche Auswertung dieses Datenmaterials ist zunächst von wissenschaftshistorischem Interesse, kann aber auch Grundlage für weiterführende forschungspolitische Analysen sein.

Dieser Beitrag beschränkt sich auf die Biografien der Nobelpreisträger auf dem Gebiet der Physik. In dieser Kategorie wurde der Preis seit 1901 in 94 Verleihungsjahren an 162 Preisträger verliehen. (Für die Jahre 1916, 1931, 1934 und 1940–42 wurde der Preis nicht vergeben.) Während hier das Ergebnis der Auswertung zusammengefasst wird, ist der Datensatz im World-Wide Web zugänglich (unter www.spektrum.de).

Alter: Das Alter der Physik-Laureaten zum Zeitpunkt der Preisverleihung ist seit 1901 kontinuierlich gestiegen. In diesem Trend spiegelt sich der Umstand, dass die Dauer der wissenschaftlichen Ausbildung und die Komplexität der aktuellen physikalischen Forschung erheblich zugenommen haben.



AKG

Porträt Alfred Nobels

Der jüngste Laureat war mit 25 Jahren William Lawrence Bragg, der den Preis 1915 zusammen mit seinem Vater William Henry Bragg für die Röntgenstrukturanalyse von Kristallen erhielt. Der Russe Pjotr L. Kapiza markiert das andere Ende der Altersskala: Er war 84 Jahre alt, als er 1978 für seine Beiträge auf dem Gebiet der Tieftemperaturphysik ausgezeichnet wurde.

Der zweitälteste Preisträger und Erfinder des Elektronenmikroskops, Ernst Ruska, musste am längsten auf die Ehrung aus Stockholm warten: 53 Jahre. Er wurde 1986 gemeinsam mit Gerd Binnig und Heinrich Rohrer ausgezeichnet, die mit dem Rastertunnelmikroskop einen weiteren technologischen Durchbruch in der Mikroskopie erzielt hatten.

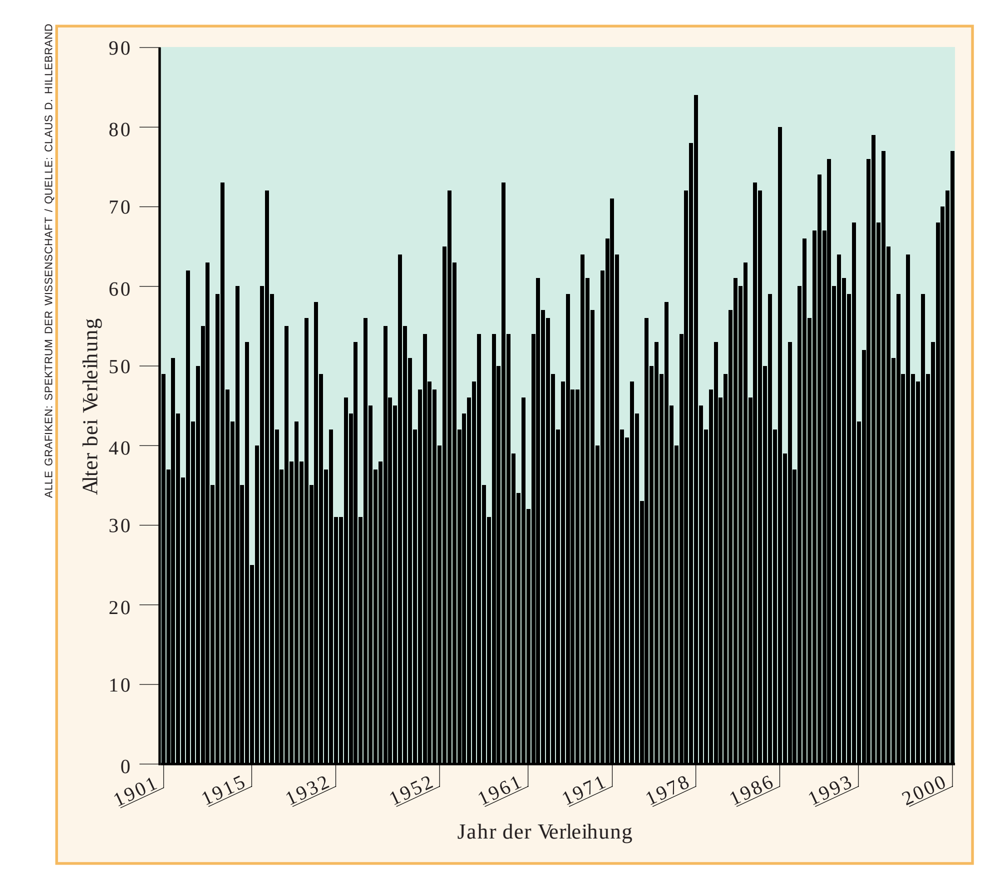
Mit am schnellsten erhielten Karl Alex Müller und Johannes Georg Bednorz die begehrte Auszeichnung. Für die 1986 entdeckten keramischen Hochtemperatursupraleiter bekamen sie bereits ein Jahr später den Physik-Nobelpreis.

Teamarbeit: Die Anzahl der Preisträger pro Verleihung ist auf drei begrenzt. Deshalb können nicht immer alle an einer bahnbrechenden Arbeit beteiligten Wissenschaftler geehrt werden. Eine faire Aufteilung des Nobelpreises scheint immer schwieriger zu werden. Denn wie das Datenmaterial zeigt, hat die Bedeutung der Teamarbeit für die ausgezeichneten Forschungen stetig zugenommen. Bis um 1940 war die Anzahl der pro gewürdigter Arbeit ausgewählten Physiker signifikant geringer als in der Folgezeit: Waren es anfangs meist Einzelpersonen, so stieg die Anzahl der Teams (mit zwei bis drei Partnern) später deutlich an.

Bei insgesamt 162 Physik-Laureaten und 94 Verleihungsjahren gab es im Durchschnitt 1,72 Preisträger pro Jahr. In der Chemie beispielsweise ist dieser Schnitt mit 1,58 Laureaten pro Verleihungsjahr niedriger. Dieser Unterschied zwischen den Disziplinen ist im Wesentlichen auf die zunehmende Bedeutung von Großexperimenten in der Physik zurückzuführen, bei denen mehrere Wissenschaftler in führender Stellung tätig sind.

Der überwiegende Teil der ausgezeichneten Teams hat seine Forschungsarbeiten in den USA durchgeführt. Deswegen ist seit den 50er Jahren die Anzahl der Preisträger aus den USA stärker gestiegen als diejenige der Laureaten aus Europa.

Zwei weitere Teamstrukturen fallen auf: Senior-Junior-Teams, bei denen der eine Partner eine Generation älter ist als der andere (zum Beispiel Müller/Bednorz und Bragg/Bragg), sowie *teams of equals* aus drei Partnern (wie William Shockley, Walter Brattain und John Bardeen, die 1956 für die Entdeckung des Transistoreffekts ausgezeichnet wurden, oder Robert Laughlin, Daniel Tsui und Horst Störmer, die den Preis 1998 für die Entdeckung einer neuartigen Quantenflüssigkeit erhielten). Senior-Junior-Teams findet man mehrheitlich in Europa, während in den USA mehr *teams of equals* anzutreffen sind. Zudem ist die



Das Alter der Physik-Nobelpreisträger zum Zeitpunkt der Preisverleihung ist seit 1901 deutlich gestiegen (insgesamt 162 Laureaten, bis zu drei Preisträger pro Jahr).

Anzahl der einzeln ausgezeichneten Nobelpreisträger in Europa dreimal so groß wie in den USA. Diese Merkmale spiegeln unterschiedliche Forschungsstrukturen wieder, die sehr wahrscheinlich Einfluss auf die Auswahl des Arbeitsumfeldes (und Kontinentes) der künftigen Preisträger haben.

Frauen: Seit 1901 haben nur zwei Frauen den Physiknobelpreis bekommen: Marie Curie 1903 für ihre Untersuchungen zur Radioaktivität und Maria Goeppert-Mayer 1963 für ihre Beiträge zur Entdeckung der Schalenstruktur von Atomkernen.

Es mag überraschen, dass seitdem keine weitere Frau zu den Preisträgerinnen gehört. Immerhin hat die Anzahl der ausgebildeten Physikerinnen in den letzten Jahrzehnten ständig zugenommen – ebenso wie die Akzeptanz von Frauen in wissenschaftlichen Positionen.

Preisträger aus Nichtindustriestaaten: Auffallend ist die geringe Anzahl von Preisträgern aus bevölkerungsreichen Ländern wie China, Indien und Pakistan. Bis auf den Inder Chandrasekhara V. Raman, der 1930 für seine Arbeiten zur Lichtstreuung ausgezeichnet wurde, haben alle anderen sechs Preisträger aus diesen drei Staaten (Chen Ning Yang, Tsung Dao Lee, Samuel Ting, Daniel Chee Tsui, Subrahmanyan Chandrasekhar und Abdus Salam) in Industrieländern studiert und dort auch die Arbeiten durchgeführt, für die sie geehrt wurden.

Bislang gibt es keine Laureaten aus Afrika, dem Nahen Osten sowie Lateinamerika. Dies ist im Wesentlichen auf das Fehlen einer technisch-wissenschaftlichen Tradition in diesen Regionen zurückzuführen, die in Europa (und in dem von Europäern besiedelten Nordamerika) immerhin in Ansätzen bis in das Mittelalter zurückreicht.

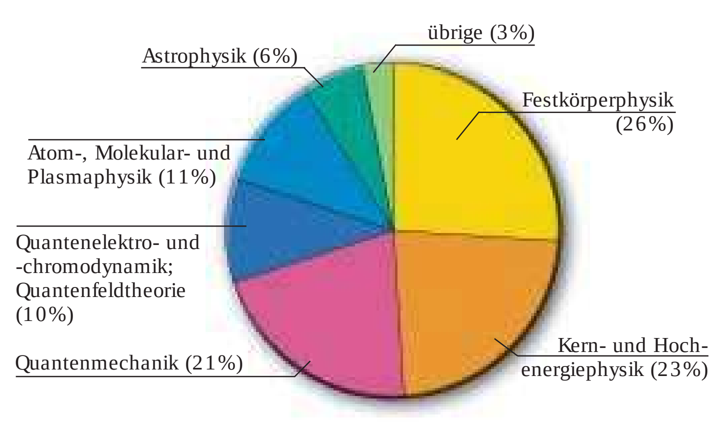
Preisträger aus Russland und Japan sind unter den G8-Staaten eher unterrepräsentiert. Dies hat unterschiedliche Gründe. Die Wissenschaftler in der vormaligen Sowjetunion waren lange Zeit isoliert: Es gab Reiseverbote, der Zugang zu internationaler Literatur war schwierig, und die Fachliteratur aus dem Ostblock wurde im Westen nicht oder kaum zur Kenntnis genommen. In Japan wiederum ist die Forschung im Allgemeinen weit stärker anwendungsorientiert als in den restlichen Industrienationen. Deshalb ist dort die Anzahl der angemeldeten Patente weit höher als in Europa.

Migration und Mobilität: Die Migration unter den Nobelpreisträgern ist ungewöhnlich groß. Die Vereinigten Staaten haben dabei in absoluten Zahlen am stärksten von einer Zuwanderung profitiert: Von den 77 Physik-Nobelpreisträgern, die in den USA leben oder lebten, stammen 28 aus Europa, China, Indien oder Kanada. Die Schweiz weist die höchste prozentuale Zuwanderung auf: Von den sieben Laureaten in der Schweiz waren drei aus den Nachbarländern Deutschland und Österreich zugewandert. Deutschland hat in absoluten Zahlen die höchste Abwanderung zu verzeichnen: 15 der 29 deutschstämmigen Physik-Nobelpreisträger gingen in andere Länder.

Die Gründe für die Abwanderung veränderten sich im Laufe der Zeit. War bis in die 20er Jahre die wirtschaftliche Situation ausschlaggebend, so erzwangen in den 30er und in den frühen 40er Jahren politische Gründe die Auswanderung. Zumeist war es auch die Elterngeneration der späteren Nobelpreisträger, die in jener Zeit ihre Heimat verließ. Beispiele hierfür sind Albert Michelson und Isaac Rabi, die als Kleinkinder mit ihren Familien in die USA kamen. Nach dem Zweiten Weltkrieg suchten viele Wissenschaftler selbst im Ausland nach besseren Arbeitsbedingungen. Die aus nichtindustrialisierten Ländern stammenden Preisträger wiederum hatten bereits ihre Ausbildung in einer Industrienation absolviert.

In den letzten Jahrzehnten förderten bi- oder multinationale Forschungseinrichtungen sowie die zunehmende inter- ▶

Aufteilung der Nobelpreise auf Teilgebiete der Physik

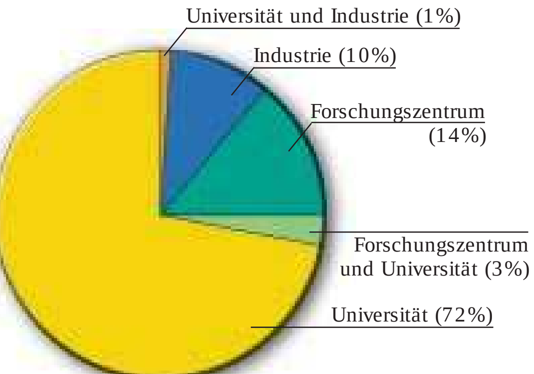


nationale Kooperation der Wissenschaftler die Mobilität. So entdeckte der deutsche Laureat Klaus von Klitzing den Quanten-Hall-Effekt im Hochfeld-Magnetlabor des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung in Grenoble. Der Italiener Carlo Rubbia und der Niederländer Simon van der Meer waren führend an der Entdeckung der *W*- und *Z*-Bosonen am Europäischen Laboratorium für Teilchenforschung Cern bei Genf beteiligt. Im industriellen Forschungsbereich kamen die schweizerisch-deutschen Teams Müller/Bednorz sowie Rohrer/Binnig über die Ländergrenzen zusammen.

Auffallend unter den europäischen beziehungsweise europäischstämmigen Preisträgern ist, dass viele in bikulturellen Gebieten aufwuchsen wie etwa in Schlesien oder im Elsass. Oft war mindestens ein Elternteil aus einem anderen Land beziehungsweise Kulturkreis eingewandert, oder die künftigen Laureaten waren während ihrer Kindheit umgezogen. Ohne diesen Zusammenhang hier näher analysieren zu können, scheint das Aufwachsen in bikulturellen Gebieten und Familien die naturwissenschaftliche Beobachtungsgabe (oder zumindest die Persönlichkeitsstruktur) zu fördern.

Seit 1950 sind fast alle Preisträger in dem Land geblieben, in dem sie ihre Entdeckung gemacht haben. Einen Landes- beziehungsweise Kontinentwechsel hat es jedoch meist bis um das dreißigste Lebensjahr der späteren Laureaten gegeben. Dies scheint auf eine sorgsame Auswahl der Arbeitsstätte hinzuweisen.

Tätigkeitsorte der Physik-Laureaten



KOMMENTAR

Sie sollten BSE im Kopf behalten!

BSE – wissen Sie noch? Das war die Rinderseuche, die in Form der neuartigen Creutzfeldt-Jakob-Krankheit mit großer Wahrscheinlichkeit auch den Menschen befällt. Inzwischen wurde der BSE-Erreger bei über hundert deutschen Rindern gefunden und die Zahl steigt weiter. Aber das nimmt kaum mehr jemand zur Kenntnis. Bis jetzt ist schließlich nichts passiert und man hat ja inzwischen andere Dinge im Kopf.

Auch die Politiker. Die deutsche Wirtschaft lahmt, da ergreift sie eher Sorge um Arbeitsplätze in Schlachthöfen als um Verbraucher. Auf EU-Ebene muss man sich an Zeitpläne halten, auch wenn die eifrig beschworenen Agrar-Reformen dann etwas langsamer vorankommen; frühestens im kommenden Jahr will EU-Agrarkommissar Franz Fischler nun die Marktordnungen in den Mitgliedsländern überprüfen. Unterdessen diskutiert man darüber, Tiermehl aus „BSE-freien" Ländern wieder zur Verfütterung an Schweine, Geflügel und Fische freizugeben. Erinnern Sie sich, dass Deutschland noch vor gar nicht langer Zeit auch „BSE-frei" war? Dabei hapert es selbst bei den dringendsten Notmaßnahmen:

➤ Bis auf Finnland hat bis jetzt kein Land bei der EU-Kommission den geforderten Bericht über die Kontrollen der Verfütterung von Tiermehl eingereicht. Die Frist hierfür war bereits Ende Mai abgelaufen.

➤ Englische Kontrolleure zogen in diesem Jahr zum wiederholten Mal Rindfleisch aus deutschen Schlachthöfen aus dem Verkehr, weil es BSE-Risikomaterial enthielt.

➤ Forscher bezweifeln, dass die Sicherheitsvorkehrungen in den Schlachthöfen überhaupt ausreichen, selbst wenn sich die Betreiber genau an die Vorschriften halten.

Und die Verbraucher? Während des Höhepunkts der Krise um die Jahreswende war der Rindfleisch-Konsum auf etwa zehn Prozent des vorherigen Niveaus eingebrochen. Damals schlugen die Gefühlswellen hoch, misstrauisch beäugten besorgte Kundinnen im Kühlregal die Joghurts und nahmen ihren Kindern die Gummibären-Tüten wieder weg. Öko-Läden hatten Hochkonjunktur. Inzwischen essen die Deutschen wieder fast so viel Rindfleisch wie früher: Auf 70 bis 80 Prozent des Niveaus von vor BSE schätzten Fleisch verarbeitende Betriebe in Deutschland den Konsum in den vergangenen Wochen.

Dabei hat sich, wie gesagt, an der Lage im Grunde nichts geändert. Im Gegenteil: Zusätzlich zu neuen BSE-Fällen vermeldet die Forschung immer wieder neue beunruhigende Ergebnisse. So unterscheidet sich bei Mäusen die Inkubationszeit für BSE je nach genetischer Disposition. Wenn das für den Menschen auch zutrifft, steht uns vielleicht die größte Zahl von Creutzfeldt-Jakob-Toten noch bevor. Aber Psychologen konstatieren kühl, die Bedrohung durch BSE sei eben zu wenig real, um das Verhalten der Menschen dauerhaft zu beeinflussen. Auch schützten sich die Menschen durch Verdrängung gegen eine zu komplexe Umwelt. Man hat ja so vieles im Kopf.

Daher für alle, die ihren Lieben wieder ein Stück Lebenskraft vom Rind servieren wollen, zur Erinnerung einige Fakten:

In England wurden bis heute mit mehr als 180 000 Tieren über 90 Prozent aller an BSE erkrankten Rinder gezählt. In England gibt es mit mehr als 100 Toten mit Abstand die meisten Opfer der neuen Variante von Creutzfeldt-Jakob. Nach wie vor weiß niemand sicher, woher der BSE-Erreger stammt. Unklar ist ebenso, wie der BSE-Erreger sich ausbreitet – nur über Tiermehl oder etwa auch über Milchersatz bei der Kälberfütterung? Oder gar auf noch völlig unbekannte Weise? Die Forscher wissen nicht, welche Tierarten er befallen kann. Noch immer ist nicht bekannt, wie leicht und auf welchen Wegen sich Menschen überhaupt anstecken können. Fleischtests identifizieren Rinder erst im fortgeschrittenen Stadium der Erkrankung. Noch immer gibt es keine Therapie für die Creutzfeldt-Jakob-Krankheit.

Vielleicht sollte man das im Kopf behalten, bevor er irgendwelche Schäden nimmt.

Hermann Englert



Der Autor ist Wissenschaftsjournalist und Biologe in Frankfurt a. M.

Ausbildung: Die Preisträger hatten mehrheitlich eine Ausbildung an einer renommierten Universität und die Betreuung durch einen bekannten Wissenschaftler angestrebt. Der Großteil von ihnen wählte neben der Physik ein zweites Studienfach. Einige wechselten im Studium erst später zur Physik. Fast acht Prozent der Laureaten haben ein anderes als ein Physikstudium absolviert.

Deutsche und amerikanische Studenten in Deutschland haben häufig nach dem Vordiplom oder Diplom den Studienort gewechselt; in den USA geschah dies nach dem Bachelor oder Master Degree. Ausschlaggebend für den Wechsel war meist die Wahl des Studienschwerpunkts oder des Betreuers der Doktorarbeit. Vor dem Zweiten Weltkrieg wechselten US-Amerikaner während der Ausbildung häufig an eine Universität in Europa. Nach 1945 erfolgte der Wechsel in umgekehrter Richtung: Europäische Studenten gingen in die USA oder in ein anderes europäisches Land.

Etwa 15 der Nobelpreisträger haben ihre Entdeckung während der Doktorarbeit (fünf davon seit 1960) und weitere 15 innerhalb von zwei Jahren nach der Promotion gemacht.

Wissenschaftliche Institutionen: Drei Viertel der Physik-Nobelpreisträger haben ihre preisgekrönte Arbeit an einer Universität durchgeführt. Etwa 15 Prozent waren in Forschungszentren tätig, zehn Prozent in der Industrie. Dabei ist zu beachten, dass Großforschungseinrichtungen erst ab den 50er Jahren etabliert wurden, zunächst in den USA, später auch in Europa. Deshalb ist der Anteil der Preisträger in solchen Zentren in den letzten fünfzig Jahren stark gestiegen. Derselbe Trend ist bei den Preisträgern aus der Industrie festzustellen – ein Anreiz für Jungwissenschaftler, in die nationalen, internationalen und industriellen Forschungszentren zu gehen.

Die Abwanderung europäischer Wissenschaftler in die USA belegt, dass die Arbeitsbedingungen dort als attraktiver empfunden werden. Dies betrifft vor allem die Ausstattung der Labors, flexiblere Strukturen und die bessere Teamarbeit.

Viele der Laureaten wechselten zwischen der Zeit der Entdeckung und dem Zeitpunkt der Preisverleihung ihren Arbeitsort – sie wurden häufig auf Grund ihrer Qualifikation abgeworben. In den USA wanderten einige Preisträger aus der Industrie zur Hochschule ab, um sich weiterhin bevorzugt der Forschung und der Lehre widmen zu können; zudem bieten die renommierten Universitäten dort auch attraktive Gehälter. In Europa hingegen ist bevorzugt ein Wechsel an nationale ▶

Jetzt weiß ich’s

von Pierre Tougne

Anne und Bernd, zwei perfekte Logiker, haben sich gegenseitig jeweils zwei Primzahlen auf die Stirn geschrieben, ohne dem andern zu sagen, welche. Die Primzahlen müssen nicht alle verschieden sein.

Chris bemerkt im Vorbeigehen: „Nimmt man von euren vier Zahlen drei beliebige heraus, so ergibt sich ein Dreieck, dessen Umfang wieder eine Primzahl ist.“

➤ Wie heißen die vier kleinsten Primzahlen, für die dies gilt?

➤ Wie heißen die zwei Primzahlen auf Bernds Stirn, wenn Anne 11 und 13 auf ihrer Stirn stehen hat und folgende Unterhaltung zwischen den beiden abläuft:

„Ich kenne meine Zahlen nicht“, sagt Bernd. Anne erwidert ihm: „Ich auch nicht.“ Worauf Bernd bemerkt: „Jetzt kenne ich meine Zahlen aber.“

➤ Wie heißen die zwei Primzahlen auf Annes Stirn, wenn Bernd 13 und 17 auf seiner Stirn stehen hat und die anschließende Unterhaltung der beiden so abläuft:

„Ich kenne meine Zahlen nicht“, sagt Anne. Bernd entgegnet ihr: „Ich kenne meine beiden Primzahlen auch nicht.“ „Das hilft mir nicht weiter. Jetzt kenne ich meine Zahlen immer noch nicht“, erwidert Anne.

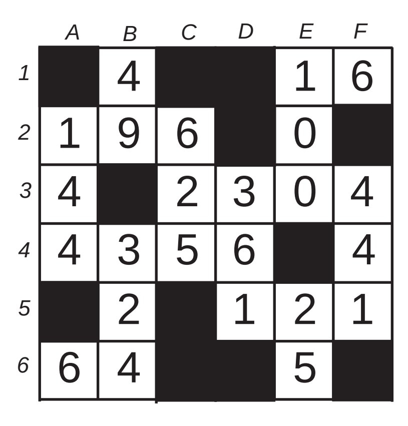
Daraufhin sagt Bernd: „Auch jetzt kenne ich meine Zahlen noch nicht.“

Worauf Anne mit einem Lächeln bemerkt: „Na, nun weiß ich, wie meine beiden Zahlen heißen.“

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Puzzles „MindScape“. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 16. Oktober 2001, eingehen.

Lösung zu „Kreuzzahlrätsel“ (August 2001)



Dies ist die einzige Lösung, die keine Quadratzahl zweimal enthält.

Ein selbst geschriebenes Programm löst das Problem in wenigen Sekunden. Über die Dauer des Schreibens hingegen bewahren die meisten Programmierer Stillschweigen.

Rita Wurth aus Öhningen zeigte, wie sich solch ein Problem auch ohne Computer lösen lässt. Mit Hilfe einer Tabelle für die Quadrate der Zahlen 4 bis 99 (das sind 6 zwei-, 22 drei- und 68 vierstellige Zahlen) bemerkt man:

➤ Die Endziffer einer Quadratzahl kann nicht 2, 3, 7 oder 8 sein.

➤ Keine der dreistelligen Zahlen hat eine 1 oder eine 3 in der Mitte.

➤ Wenn in einer dreistelligen Zahl eine Null vorkommt, dann nur doppelt: 100, 400 oder 900.

Kennzeichnen wir jede Zahl durch das Feld, in dem sie beginnt. Die vierstellige *A*4 kann an keiner Stelle eine Null enthalten; sonst würden, von links nach rechts, *A*4, *B*4, *C*3 oder *D*5 mit null beginnen. In den Feldern *A*4 und *C*4 sind 2, 3, 7 und 8 ausgeschlossen, in *D*4 1 und 3. Damit bleiben noch 11 vierstellige Zahlen für *A*4 übrig. Mit ihnen probiert man weiter …

Die Gewinner der drei Ampli-Tuner R-811 RDS von Onkyo sind Ute Fuhrmann, Darmstadt; Janina Wördehoff, Braunschweig; und Johannes Philipp, Affalterbach.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet „Mathematik“ jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Forschungseinrichtungen wie zum Beispiel Max-Planck-Institute zu beobachten. Dort werden die Arbeitsbedingungen ebenfalls als attraktiver empfunden: Die Forschungsschwerpunkte lassen sich stärker beeinflussen, die Projektfinanzierung ist einfacher, und es gibt eine enge Zusammenarbeit mit den Universitäten.

Industrie und Forschungszentren: Zwölf Prozent der Physik-Nobelpreisträger haben ihre bahnbrechenden Arbeiten in Forschungszentren der freien Wirtschaft durchgeführt: elf in den Bell-Laboratorien (vormals AT&T und heute Lucent Technologies), fünf bei IBM und je einer bei Texas Instruments, General Electric und Svenska Aktiebolaget Gasaccumulator. Wenngleich die Industrie allgemein mehr an anwendungsorientierter Forschung interessiert ist, erlauben sich vor allem amerikanische Großunternehmen, Wissenschaftler in der Grundlagenforschung zu beschäftigen und ihnen ein interessantes Arbeitsumfeld zu bieten.

Letzteres ist auch der Grund dafür, warum in den Lebensläufen von Preisträgern immer wieder die internationalen und nationalen Großforschungszentren wie Cern, Fermilab und Stanford auftauchen. Viele Laureaten haben während ihrer wissenschaftlichen Karriere eine Zeit lang in solchen Institutionen geforscht, selbst wenn die später ausgezeichnete Arbeit dort nicht durchgeführt wurde. Offenbar sind solche Großforschungseinrichtungen eine ideale „Brutstätte“ für Ideen und Kooperationen.

Fachkategorien: Etwa 25 Prozent der Laureaten sind für theoretische Arbeiten, zwölf Prozent für technologische Durchbrüche (wie Spezialmikroskope, Beschleuniger und Detektoren) und der überwiegende Rest für experimentelle Entdeckungen ausgezeichnet worden. Jeweils rund ein Viertel der Nobelpreise entfallen auf die Festkörperphysik, die Kern- und Hochenergiephysik sowie die Quantenmechanik (Grafik S. 95 unten). Die Arbeiten in der Kernphysik wurden seit den 50er Jahren von solchen in der Hochenergiephysik abgelöst. Ansonsten lässt die Aufteilung nach Teildisziplinen keine besondere Zeitstruktur erkennen.

Die aus den Lebens- und Berufsdaten von Physik-Nobelpreisträgern abgeleiteten Informationen sind gewiss nicht repräsentativ, können aber doch als wichtige Indikatoren für die Vor- und Nachteile der länderspezifischen Forschungssysteme dienen.

Claus D. Hillebrand *ist promovierter Physiker und bei einem internationalen Technologiekonzern in Frankfurt a. M. tätig.*

Viele Wissenschaftler bevorzugen die eine oder andere Teamstruktur und wählen danach ihren Tätigkeitsort aus. Wegen der zunehmend komplexer werdenden Fragestellungen in der physikalischen Forschung mögen die in den USA üblichen Teams aus mehreren gleichberechtigten Partnern attraktiver erscheinen als die in Europa stärker vertretenen Senior-Junior-Teams.

Die Attraktivität des Arbeitsumfeldes stellt für viele Preisträger das Hauptkriterium dar, nach dem sie ihre Arbeitsstätte auswählen. Hier stehen die Universitäten heute im direkten Wettbewerb mit den zumeist besser ausgestatteten und dynamischeren nationalen, internationalen und industriellen Forschungszentren. Die Anzahl der Nobelpreisträger pro Land hängt indes nicht direkt vom Budget für Forschung und Bildung ab. Auch kleine Länder und kleine Universitäten oder Institute sind für gute Wissenschaftler attraktiv, wenn sie über ein offenes Schulsystem, durchdachte Lehrpläne, flexible Finanzierungssysteme und Förderungsprogramme für besonders Begabte verfügen.

Aus den Lebensläufen der bisherigen Nobelpreisträger lässt sich nicht der „Königsweg" herauslesen, der zum wissenschaftlichen Erfolg führt. Allerdings zeigt ein Blick auf die Biografien, dass frühes Interesse für die Wissenschaften, eine gute Ausbildung, harte Arbeit und Mobilität förderlich sind. Eine gute Portion Glück braucht es allerdings auch. ■

AM RANDE

Schwarze Löcher, Weiße Zwerge & Co.

Frage: Wer ist für die Öffentlichkeitsarbeit der Wissenschaft zuständig? Antwort: Die Metaphern. Oder glaubt jemand im Ernst, dass beispielsweise die Astrophysiker ohne die tatkräftige Unterstützung ihrer Weißen Zwerge und Roten Riesen mit so beständigem Erfolg ihre populärwissenschaftlichen Büchlein unters gemeine Volk streuen könnten? Wenn auch nicht zu diesem Zweck in die Welt gesetzt, nutzen Metaphern ihren forschenden Schöpfern vor allem beim Kontakt mit der Außenwelt, und der ist nicht nur beim Einwerben von Drittmitteln lebenswichtig oder gar lukrativ.

Nun aber scheint das Ende der fetten Jahre gekommen: Der Wissenschaft geht es an den Kragen. Die Wirtschaft hat Alarm geschlagen und kontert mit Macht. Ihr Gegenschlag ist so genial wie einfach: Damit das Geld nicht länger in die Hände obskurer Forscher abwandert, muss deren Sprachschatz umgekehrt in den Besitz der Finanzwelt gebracht werden.

Metaphernklau nennt man so etwas ... es wird spürbar eng auf dem Sprachmarkt. Wer die ersten Aktionärshauptversammlungen, auf denen Anzugträger ohne Wimpernzukken von „Umsatz-Quantensprüngen" prahlten, noch als Einzelfälle abtat, schreckt bei den neuesten Bilanz-Pressekonferenzen aus dem Dämmerschlaf: „Anspruchsvolles Finanzwissen ist unser genetischer Code", lässt da ein mit allen Wassern gewaschener Wirtschaftsboss als Aufmacher in der FAZ platzieren. Wessen Herz, wenn es für die Wissenschaft schlägt, zuckt da nicht peinlich berührt zusammen?

Die Lage könnte ernster kaum sein. Hier geht es nicht mehr um harmlose „Schwarze Löcher" in den Kassen irgendwelcher Parteien, in denen Geld samt Wählergunst auf immer verschwinden! Wenn Ron Sommer demnächst auf einer Recruitingveranstaltung seinen Führungskräften von morgen zujubelt, sie seien die „Stammzellen" der Deutschen Telekom, dann ist die Zukunft der deutschen Wissenschaft Vergangenheit!

Forscher aller Bundesländer, vereinigt Euch! Schützt Eure Metaphern!

Carsten Könneker

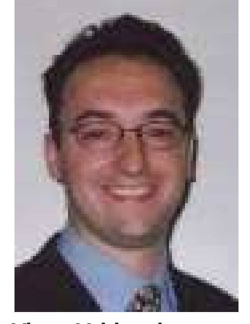
„AUSGEZEICHNET"

MICHAEL-JÄGER-PREIS

Schmerzfrei durch späte Sehnenrekonstruktion

Die Gesellschaft für Orthopädisch-Traumatologische Sportmedizin (GOTS) hat auf ihrer Jahrestagung in München den Michael-Jäger-Preis an den jungen Schweizer Arzt Victor Valderrabano verliehen. Der Preis wird zu Ehren von Professor Michael Jäger, dem ehemaligen Ordinarius für Orthopädie der Universität München, vergeben.

Der Preisträger, der an der Universitätsklinik Basel mit dem Schwerpunkt Fußorthopädie tätig ist, wird für eine ausgesprochen praxisorientierte Arbeit ausgezeichnet. Er wurde immer wieder mit Sportverletzungen konfrontiert, die zunächst einen Knick-Senkfuß, dann einen schmerzhaften Plattfuß und schließlich Arthrose und Gehunfähigkeit nach sich zogen. Erst vor zehn Jahren hatten die Mediziner erkannt, dass dieses Krankheitsbild durch den Riss einer Sehne hervorgerufen wurde, die zum hinteren Schienbeinmuskel, dem Musculus tibialis posterior, führt. Als Folge dieses Sehnenrisses büßte der Muskel seine Funktion ein.


Victor Valderrabano

Eine Therapie erwies sich als schwierig, weil die meisten Patienten mit diesem Krankheitsbild erst dann ärztliche Hilfe nachsuchten, als die Schmerzen einsetzten – zumeist erst mehrere Monate nach dem Sehnenriss. In der Fachliteratur fand sich kein Hinweis, wie in solch späten Fällen zu verfahren sei.

Victor Valderrabano entschied sich schließlich für die Rekonstruktion der Sehne und entwickelte dafür zwei Methoden. Bei der einen zieht er die beiden Sehnenteile heran und näht sie zusammen. Bei der anderen nutzt er die parallel verlaufende Lange Zehenbeuger-Sehne (Flexor digitorum longus-Sehne), die er von beiden Seiten an die gerissene Sehne des hinteren Schienbeinmuskels annäht, sodass sie deren Funktion mit übernehmen kann.

Alle Patienten, die Valderrabano auf diese Weise behandelte, waren nach der Operation schmerzfrei. Sehne und Muskel funktionierten wieder gut. Drei Viertel der Patienten konnten sogar wieder sportlich aktiv sein.

(Seiten 100, 101 und 102: Anzeige und Beihefter)

EINLADUNG ZUM ABONNEMENT

Spektrum der Wissenschaft informiert monatlich über den aktuellen Stand von Naturwissenschaften, angewandter Forschung und Technologie. Auf hohem sachlichem Niveau, kompetent und authentisch – denn hier schreiben international renommierte Wissenschaftler selbst über ihre Arbeiten.

WIR MÖCHTEN AUCH IHRE FREUNDE FÜR UNS GEWINNEN

Als Abonnent von Spektrum der Wissenschaft können Sie aus eigener Erfahrung am besten beurteilen, wie wichtig es ist, kompetent, umfassend und authentisch informiert zu sein. Es wird Ihnen daher sicher nicht schwer fallen, unter Ihren Freunden und Bekannten einen neuen Spektrum-Abonnenten zu finden.

Als Dank für Ihre Empfehlung erhalten Sie wahlweise eine der abgebildeten Prämien.



TOURING SET – der ideale Begleiter für lange Autofahrten. Die Isolierflasche umfasst 0,9 Liter. Die beiden Becher (0,4 Liter) sind passend für Standard-Autohalterungen und haben einen fest schließenden Deckel mit Trinköffnung.

DAS DARWIN-VIRUS
Dieser grimmig-intelligente, fesselnde Roman steckt voller Abenteuer und Ideen um Genetik und Evolution. Greg Bears temporeicher Thriller, der um so zeitlose menschliche Fragen wie Kampf, Verlust und Erlösung kreist, zählt gewiss zu den gelungensten Wissenschaftsromanen der letzten Jahre.



ARMBANDUHR „WELLE“
Diese Uhr wurde exklusiv für Spektrum der Wissenschaft produziert. Das Motiv entstammt dem von der Deutschen Forschungsgesellschaft geförderten Projekt „Nanostrukturen an Grenzflächen und Oberflächen”.

NUTZEN SIE DIE VORTEILE DES ABONNEMENTS:

Als Abonnent erhalten Sie Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis für monatlich DM 12,32/€ 6,30 einschließlich Versand; Schüler und Studenten zahlen nur DM 10,66/€ 5,45.

Das Postkartenbuch „Die kleine Astro-Galerie“ schenken wir Ihnen als Dank für Ihr Interesse.

Außerdem haben Sie als Abonnent freien Zugang zu unserem Online-Archiv. Dort liegen für Sie alle zurückliegenden Ausgaben von Spektrum der Wissenschaft seit 1993 im Volltext bereit.

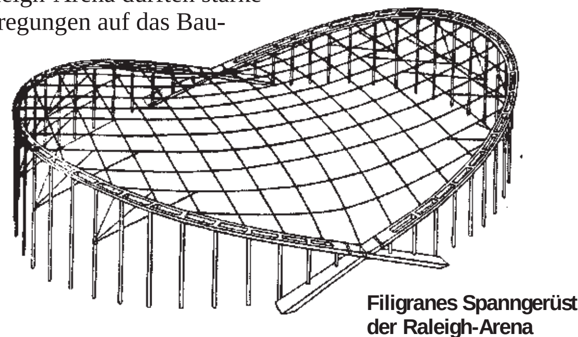


BEGINNEN SIE IHR ABONNEMENT MIT DER NÄCHSTEN AUSGABE UND SENDEN SIE NEBENSTEHENDE BESTELLKARTE AN UNS AB.



Luftiges Stadion mit Neoprene-Haut

Die Raleigh-Arena in Nord Carolina USA ist annähernd kreisrund bei einer Spannweite von etwa 100 Metern. Sie wird mit einem hängenden Dach zwischen zwei schrägliegenden Stahlbetonbögen überspannt. ... Die Dachhaut besteht aus einem gummierten Orlonfasergewebe – Neoprene –, das auf der Oberseite zur Abminderung der Sonneneinstrahlung mit Aluminiumfarbe gestrichen ist. ... Das Neoprene wird auf gummiummantelte Stahlseile geklebt, die von stärkeren Tragseilen getragen werden. Die Tragseile belasten die schrägliegenden Stahlbetonbögen. ... Von der Raleigh-Arena dürften starke Anregungen auf das Bauschaffen der gesamten Welt ausgehen. *(Die Bautechnik, 28. Jg., Heft 10, 1951, S. 254/255)*



Filigranes Spanngerüst der Raleigh-Arena

Neuartige Langspielplatten

Anläßlich der Eröffnung der Deutschen Musikmesse übergab die Deutsche Grammophon Gesellschaft ihre neuen Langspielplatten mit 33 1/3 U/min der Öffentlichkeit. Bei 30 cm Durchmesser enthält eine einzige Seite bis zu 22 Minuten Musik. Auf einem Millimeter sind acht bis zehn Schallrillen untergebracht und die seitlichen Auslenkungen dürfen nicht mehr als 20 Tausendstel Millimeter betragen. ... Um trotz der erforderlich werdenden höheren Verstärkung beim Abspielen das Nutz-Störspannungs-Verhältnis gering zu halten, mußte ein neuartiger unzerbrechlicher Kunststoff gewählt werden. *(Funkschau, 23. Jg., Nr. 20, 1951, S. 408)*

Schwangerschaftsnachweis mit männlichen Fröschen und Kröten

In Deutschland hat man Versuche mit der Gemeinen Erdkröte angestellt. Diese ist anspruchslos und zählebig und daher viel leichter zu halten als der lebhaftere Wasserfrosch. Auch das Einspritzen des Urins verträgt sie besser. Vor allem liefert die Kröte das Ergebnis schneller als der Frosch. ... Die Schwierigkeit liegt nur darin, Männchen und Weibchen zu unterscheiden. ... Jedes Tier kann etwa 9mal in einem Abstande von 10 Tagen benutzt werden. ... Wird nun der Urin einer Schwangeren dem Tier eingespritzt, so bewirkt das enthaltene Choriongonadotropin eine Spermatozoen-Ausschüttung aus der Samenblase in die Blase des Tieres. Von hier werden die Samenzellen mit dem Urin ausgeschieden und können getestet werden. *(Kosmos, 47. Jg., Heft 10, 1951, S. 477)*



Elektrische Hinrichtungen

Bis zur Stunde sind die Vereinigten Staaten Nordamerikas das einzige Land, in welchem die Elektrizität zum furchtbaren Instrument in der Hand des Nachrichters geworden ist. ... Bemerkt sei, dass die Sektion der elektrisch Hingerichteten äusserst wenig Veränderungen der Organe ergeben hat, jedenfalls keine Verletzung der lebenswichtigen Teile; die Mechanik des „elektrischen Todes“ ist zur Stunde noch wenig aufgeklärt. Die auffälligsten Zeichen sind oberflächliche Verbrennungen, die selbstverständlich lange nicht hinreichen, den Tod zu erklären. *(Die Umschau, V. Jg., Nr. 44, 1901, S. 877)*

Feuerlöschgranate

Zahlreiche Brände würden schon im Entstehen erstickt werden können, wenn überall und mehr als bisher, durch Aufstellung kleinerer, augenblicklich angriffsbereiter Löschapparate Vorkehrungen zur sofortigen und wirksamen Bekämpfung des Feuers getroffen wären. ... Von Gustav Pickhardt in Bonn werden Löschgranaten empfohlen, die in kleinen Wandkörben aufzubewahren sind und weder durch Wärme noch durch Kälte leiden sollen. Die Vorrichtung besteht aus einem doppelten Glasbehälter, welcher zwei Flüssigkeiten von gegenseitiger Reaktion enthält. Beim Hineinwerfen einer solchen Granate in das Feuer zerspringt das Glas, und es entwickelt sich ein stickstoffhaltiges Gas, unter dessen Einwirkung die Flammen erlöschen. Bricht in der Nähe des Aufbewahrungsortes der Granaten Feuer aus, so wirken dieselben durch ihr Zerplatzen selbstthätig. *(Annalen für Gewerbe und Bauwesen, Bd. 49, Nr. 583, 1901, S. 138/139)*

Erste photographische Sternkarte bald vollendet

Bereits 1890 wurde der Plan gefasst, mit Hilfe der Photographie eine das ganze Himmelsgewölbe umfassende Sternkarte herauszugeben. Der Bericht des hierzu ernannten internationalen Komitees liegt jetzt vor... Die besten ohne Hilfe der Photographie hergestellten Sternverzeichnisse ... sind Argelanders „Durchmusterung“ und der Katalog der „Astronomischen Gesellschaft“. Bei Argelander erscheinen auf einer bestimmten Fläche etwa 10 000 Sterne, im Katalog der Astronomischen Gesellschaft noch nicht 5000. Die photographische Platte enthält auf der gleichen Fläche des Himmelsgewölbes über 58 000. … Das Ende aller Arbeiten steht in Kürze zu erwarten. *(Photographische Rundschau, 15. Jg., 1901, S. 229)*

BOTANIK



Henning Haeupler und Thomas Muer

Bildatlas der Farn- und Blütenpflanzen Deutschlands

Ulmer, Stuttgart 2000. 759 Seiten, DM 148,–

Unsere heimische Flora ist vergleichsweise übersichtlich. Doch manch botanische Exkursion gerät alsbald in einen undurchdringlichen Dschungel, wenn es auch nur eine der vielen Löwenzahnformen, die schon Carl von Linné irritierten, beim richtigen Namen zu nennen gilt. Das vorliegende Werk bietet gleich 21 verschiedene Löwenzahn-Fotos, um die mit etwa 370 Sippen artenreichste Gattung der deutschen Flora zu dokumentieren – ein Paradebeispiel dafür, wie weit das Bemühen der Herausgeber um Vollständigkeit gediehen ist.

Fotobildbände unserer heimischen Wildpflanzen gibt es viele. Doch selbst die umfangreichsten können diesem Bildatlas nicht das Wasser reichen: 3900 Farbfotos und 134 Schwarzweißzeichnungen geben die Merkmale von insgesamt 4145 Sippen (Taxa) aller wild in Deutschland vorkommenden Höheren Pflanzen wieder, dazu einige jener Kultur- und Zierpflanzen, die zumindest regional eingebürgert sind.

Viele Mitarbeiter haben Texte, Fotos oder Zeichnungen geliefert. Nur so war diese bedeutende Arbeit in sechs Jahren zu bewältigen. Dass dieser Band nicht nur höchsten wissenschaftlichen und didaktischen, sondern auch ästhetischen Ansprüchen genügt, ist das Verdienst der beiden federführenden Autoren.

Henning Haeupler, Leiter der Arbeitsgruppe Geobotanik am Lehrstuhl Spezielle Botanik der Ruhr-Universität Bochum, organisiert und plant seit 1967 die floristische Kartierung in Deutschland. Thomas Muer, Biologielehrer und seit 1981 auf Pflanzenfotografie spezialisiert, hat nicht nur die Beschaffung des Bildmaterials organisiert, sondern auch die Hälfte der beschreibenden Texte beigesteuert und einen Großteil des gelungenen Layouts erstellt.

Artabgrenzung ist häufig eine Ermessenssache. Die Taxonomen können auf diesem schwierigen Gebiet derzeit noch keine verbindlichen Regelungen anbieten. So wechselt der taxonomische Rang einer Pflanze oftmals von Quelle zu Quelle. Haeupler und Muer sprechen konsequent von Sippen (Taxa) und nehmen der Vollständigkeit halber auch sehr viele schwer abgrenzbare Arten auf, dazu extrem seltene Arten sowie Unterarten, Varietäten und apomiktische (sich ungeschlechtlich fortpflanzende) „Kleinarten“.

Neben einem Farbfoto eines typischen Exemplars der Sippe – und nach Bedarf Detailzeichnungen – bringt ein im Telegrammstil gehaltener Text die wichtigsten Bestimmungsmerkmale sowie Angaben zur Verbreitung in den Naturräumen, zur Gefährdung und zum gesetzlichen Schutz sowie zur Nutzbarkeit für den Menschen.

Um den Leser präzise und Platz sparend über die Standorte der einzelnen Pflanzen zu informieren – was schon für die Bestimmung von entscheidender Bedeutung sein kann –, liefern die Autoren im einleitenden Tabellen- und Kartenteil eine systematische Übersicht aller in Deutschland vorkommenden Biotoptypen. Wem das ewige Hin und Her der Nomenklatur schon so manchen Streich gespielt hat, den wird die Tabelle mit den wichtigsten Namensänderungen auf Gattungsniveau besonders erfreuen. Außerdem gibt es ein ausführliches Register der Familien, Gattungen und Arten sowie zahlreiche Verweise auf Synonyme.

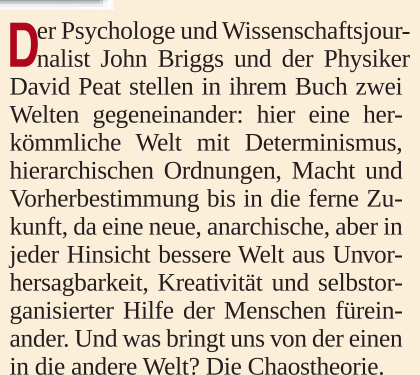


Die Früchte der Stachelgurke *Echinocystis lobata* sind 4 bis 6 cm lang, elliptisch geformt und stachlig.



WISSENSCHAFT ALLGEMEIN





John Briggs und David Peat

Chaos

Abschied von der Sehnsucht, alles in den Griff zu bekommen

Aus dem Amerikanischen von Karl-Heinz Ebnet.
Droemer Knaur, München 2000. 208 Seiten, DM 44,–

Der Psychologe und Wissenschaftsjournalist John Briggs und der Physiker David Peat stellen in ihrem Buch zwei Welten gegeneinander: hier eine herkömmliche Welt mit Determinismus, hierarchischen Ordnungen, Macht und Vorherbestimmung bis in die ferne Zukunft, da eine neue, anarchische, aber in jeder Hinsicht bessere Welt aus Unvorhersagbarkeit, Kreativität und selbstorganisierter Hilfe der Menschen füreinander. Und was bringt uns von der einen in die andere Welt? Die Chaostheorie.

Oh weh. Kreativität, bestehende Hierarchien durchbrechen, das Unerwartete tun – das sind wundervolle Ideen, und eine Welt, in der alle sich lieben, sowieso. Aber sie folgen beim besten Willen nicht aus der Chaostheorie.

Es gibt die klassische Allmachtsfantasie, etwa: Die Welt ist geordnet, vorhersagbar und bis ins Letzte beherrschbar, mit einer gewissen wissenschaftlichen Begründung im klassischen Determinismus. Dass man die Welt dann auch beherrschen, bis ins Letzte ordnen und damit langweilig machen soll, diese Folgerung hat die Naturwissenschaft noch nie hergegeben. Die Chaostheorie erschüttert nun diese wissenschaftliche Begründung; mehr nicht! Daraus ein neues – zugegeben: schönes, sympathisches – Weltbild herleiten zu wollen ist genauso unbegründet wie das klassische Beherrschungs-Paradigma.

Briggs und Peat, die sich vor Jahren („Die Entstehung des Chaos“, 1990, und „Chaos. Neue Expeditionen in fraktale Welten“, 1993) erfolgreich um populäre Darstellungen des wissenschaftlichen Chaosbegriffs bemüht haben, sind mit ihrem neuen Buch unter die vielen Möchtegern-Philosophen abgerutscht, die aus der unschuldigen Chaostheorie die unglaublichsten Dinge ableiten. (Deren ernsthafte Vertreter sprechen inzwischen lieber von der „Theorie der dynamischen Systeme“.)

Es gibt jede Menge gute Gründe für Kreativität und das Infragestellen des Bestehenden. Man muss die arme Chaostheorie nicht dazu missbrauchen.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Die Nutzung des Werks bedarf einiger Übung, denn die komprimierten Texte enthalten viele Abkürzungen. Da wäre ein herausnehmbares Abkürzungsverzeichnis – beispielsweise in Form eines Lesezeichens – eine große Hilfe.

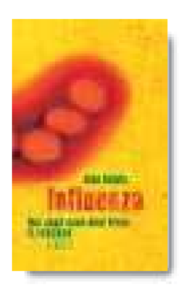
Dieser Bildatlas ist als zweiter Teil einer Trilogie angelegt, die zu einer umfassenden Gesamtbilanz unserer heimischen Flora werden soll. Der erste Band, die „Standardliste der Farn- und Blütenpflanzen Deutschlands“ (Rolf Wisskirchen und Henning Haeupler, 1998), bietet eine wissenschaftlich abgesicherte Namensreferenz für alle in Deutschland wild oder eingebürgert vorkommenden Höheren Pflanzen. Den Abschluss wird der „Verbreitungsatlas der Farn- und Blütenpflanzen Deutschlands“ bilden.

Auch die Herausgabe einer CD-ROM ist geplant, die zusätzliche Detailfotos und vor allem Standortfotos zur besseren Verdeutlichung ökologischer Zusammenhänge enthalten soll. Zugleich soll ein „interaktiver Bestimmungsschlüssel“ angeboten werden. Schon jetzt ist das Bilddatenmaterial im Internet unter www.floraweb.de abrufbar.

Kein Zweifel, dieser gemeinsam mit dem Bundesamt für Naturschutz herausgegebene Bildatlas setzt Maßstäbe. Doch Vervollkommnung und Eindeutigkeit – so Haeupler in seiner Einleitung – wird dieses Werk erst durch die stete Verbesserung, Ergänzung und Korrektur seitens seiner Nutzer erlangen. Somit ist dieser einzigartige Band nicht nur Bilanz, sondern zugleich auch Aufforderung und Ansporn zur Mitarbeit. Kein Feldführer, doch eine stete Versuchung, sich immer wieder ins Feld zu wagen.

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und freier Journalist in Celle.



MEDIZIN

Gina Kolata

Influenza

Die Jagd nach dem Virus

Aus dem Englischen von Irmengard Gabler.
S. Fischer, Frankfurt am Main 2001. 351 Seiten, DM 39,90

Wissen Sie, welches Ereignis im 20. Jahrhundert die meisten Todesopfer gefordert hat? Der Zweite Weltkrieg? Falsch. Es war die Grippeepidemie von 1918. Allein in den USA starben damals innerhalb weniger Monate über 20 Millionen Menschen, und weltweit dürften es rund 100 Millionen gewesen sein – die genaue Zahl kennt niemand.

Umso erstaunlicher, dass diese Epidemie fast völlig in Vergessenheit geraten ist. Warum das Influenzavirus, ein ansonsten recht harmloser Krankheitserreger, auf einmal so bösartig wurde und warum diese Variante nach wenigen Monaten wieder verschwand, wurde nie geklärt. Die vielfach ausgezeichnete amerikanische Autorin Gina Kolata ist der Spur nachgegangen; herausgekommen ist ein Musterbeispiel für besten Wissenschaftsjournalismus.

Nachdem die ersten Kapitel den Leser in die gruselige Welt der US-Militärkrankenhäuser von 1918 entführen, zeichnet Kolata die Entwicklung der modernen Molekularbiologie und Virusforschung im 20. Jahrhundert nach. Dass ihre Schilderung nie trocken wird, dafür sorgen menschlich-allzumenschliche Episoden, etwa über den schwedischen Wissenschaftler und Abenteurer Johan V. Hultin, der in den fünfziger Jahren im Permafrost Alaskas nach Grippetoten suchte. Selbst eine Anekdote über die Farbenblindheit des britischen Chemikers John Dalton (1766–1844), der die Atomtheorie in der Neuzeit wieder belebte, fügt sich zwanglos in den Erzählfluss ein.

Und wie endet das Ganze? Eigentlich gar nicht – in den letzten Jahren hat die Forschung sich zwar intensiver mit dem Influenzavirus befasst, aber die Epidemie von 1918 bleibt ein Rätsel, das noch seiner Lösung harrt.

Die Übersetzung ist gut gelungen, wenige kleine Schnitzer stören das Lesevergnügen nicht.

Sebastian Vogel

Der Rezensent ist promovierter Biologe und Wissenschaftspublizist in Köln.



Ein Mann wird 1918 von einem Straßenbahnschaffner in Seattle daran gehindert, den Wagen zu betreten, weil er keinen Mundschutz trägt.



MEDIZINETHIK

Bert Gordijn und Henk ten Have (Hg.)

Medizinethik und Kultur

Grenzen medizinischen Handelns in Deutschland und den Niederlanden

Frommann-Holzboog, Stuttgart 2000. 507 Seiten, DM 98,–

Der vorliegende Band fasst die Referate eines Projekts namens „Beschränkungen medizinischen Handelns – kulturelle Unterschiede“ zusammen, das 1997 vom Philosophischen Institut der Universität Münster und vom Fachbereich für Ethik, Philosophie und Geschichte der Medizin der Katholischen Universität Nijmegen (Niederlande) gemeinsam veranstaltet wurde. Themen waren vor allem die Therapiebegrenzung, die aktive Sterbehilfe, die Schmerztherapie und die Palliativmedizin.

Nicht erst seit der Verabschiedung des niederländischen Gesetzes zur aktiven Sterbehilfe ist bekannt, dass sowohl die medizinische Praxis als auch die juristische und ethische Würdigung in Deutschland und in den Niederlanden erheblich auseinander gehen.

Euthanasie ist in den Niederlanden definiert als „absichtliches lebensbeendendes Handeln durch eine andere als die betroffene Person, auf deren ausdrückliches Verlangen hin“. Dabei meint „Absicht“ den direkten Vorsatz, und „Han- ▶

deln“ ist ebenfalls im engen Sinne zu verstehen; denn die hoch dosierte Schmerztherapie, die als Nebenfolge den vorzeitigen Tod in Kauf nimmt, und die Beendigung der Therapie gelten nicht als Euthanasie, sondern als „normale medizinische Praxis“. Dagegen ist Beihilfe zum Suizid in den Niederlanden anders als in Deutschland strafbar.

Der Freiburger Jurist Hans-Georg Koch referiert die deutschen Abgrenzungen zwischen der strafbaren aktiven und der durch Bundesgerichtshofsurteil für zulässig erklärten „indirekten“ Sterbehilfe, das ist die Schlaf- oder Schmerzmittelgabe, bei welcher der Tod des Patienten nicht direkt beabsichtigt, aber in Kauf genommen wird.

Der Ethiker Bert Gordijn aus Nijmegen ordnet den Stand der Diskussion in beiden Ländern in ein dreistufiges, allgemeines Schema für die gesellschaftliche Diskussion schwieriger Themen ein:

- Konfrontation mit Ausgang in Akzeptanz oder Ablehnung,
- Integration mit Entwicklung von Regelungen und Strukturen und
- Auseinandersetzung mit den resultierenden Auswirkungen.

Er sieht die Niederlande auf der zweiten Stufe, Deutschland noch auf der ersten.

Im Gesamteindruck bestätigt das Buch dieses Bild. Es ist eindrucksvoll, mit welcher besonnenen Nüchternheit und Ernsthaftigkeit sich die Niederländer kritisch mit den Konsequenzen ihrer Gesetzgebung und Handlungspraxis auseinander setzen. Verglichen damit müssen wir Deutschen erst noch soziokulturell erwachsen werden.

Die Niederlande umgehen den Konflikt zwischen grundsätzlicher Strafbarkeit und faktischer Zulassung der aktiven Sterbehilfe mit einem landestypischen juristischen Instrument, dem „Gedogen“. Die Bedingungen sind: unerträgliches und aussichtsloses Leiden, keine Alternative zur Linderung, Aufklärung des Patienten, Dauerhaftigkeit und Vertretbarkeit des Verlangens, Konsultation eines anderen Arztes, Ausführung durch einen Arzt und Einhaltung des Meldeverfahrens. Inzwischen ist die Zusicherung der Straffreiheit etablierte Praxis.

Dagegen werde in Deutschland unter „Euthanasie“ etwas völlig anderes verstanden: Vor und im Nationalsozialismus wurde die Freigabe der individuellen Tötung schwerstgradig Behinderter und Kranker einerseits mit der Leidens-Erlösung, andererseits mit einem simplifizierten Darwinismus begründet und zu der Tötung von insgesamt über 100000 Menschen entwickelt. Angesichts dieser Unterschiede sei das Dammbruchs-Argument – die Zulassung einer Euthanasie-Praxis niederländischer Prägung müsse verhindert werden, weil sie der erste Schritt zu einer Massentötung Behinderter sei – unangemessen.

Zur medizinischen Praxis wissen der Philosoph Evert van Leeuwen und der Arzt Gerrit Kimsma aus Amsterdam aus einer anonymen Befragung niederländischer Ärzte von 1995 Erstaunliches zu berichten. Nach ihren Untersuchungen haben in einem Jahr 9700 Patienten die Euthanasie verlangt; in 3200 Fällen wurde sie tatsächlich ausgeführt. In 900 Fällen wurde aktive Sterbehilfe ohne Einwilligung des Patienten praktiziert, in 400 Fällen Beihilfe zum Suizid. Dazu kommen 25000 Fälle von indirekter Sterbehilfe und 27000 Fälle von Behandlungsabbruch, was sich auf 42,6 Prozent aller Todesfälle überhaupt addiert. Dabei sind allerdings alle Gaben von Beruhigungsmitteln in der Sterbephase mitgezählt, die man bei flüchtiger Betrachtung gar nicht als problematisch ansehen würde.

Van Leeuwen und Kimsma halten das in ihrem Lande vorgeschriebene Meldeverfahren für nicht unproblematisch. Dass die Praxis der Sterbehilfe zumindest zahlenmäßig bekannt und insoweit öffentlich überprüfbar sein sollte, ist unbestritten. Um die Meldebereitschaft zu erhöhen, hat der Staat weit reichende Straffreiheitszusagen abgegeben – was nicht verhinderte, dass zum Beispiel ein Arzt, der einem depressiven, aber nicht

sterbenskranken Patienten Sterbehilfe leistete, vom staatlichen Obersten Gerichtshof freigesprochen, vom Berufsgericht seiner Standesorganisation jedoch verurteilt wurde.

Fälle wie dieser sind nicht dazu angetan, die Meldebereitschaft zu erhöhen. Dabei muss die Befürchtung des Arztes, er würde seine Handlung nicht vor offiziellen Gremien rechtfertigen können, nicht

„Euthanasie" ist in den Niederlanden Tötung auf Verlangen

unbedingt im Vordergrund stehen. Die vermutlich erhebliche Dunkelziffer ist auch damit zu erklären, dass der Arzt das Vertrauensverhältnis zum Patienten und die Intimsphäre seiner Familie nicht stören will. Dem entsprechen die Zahlen aus der anonymen Befragung, nach denen fast drei Viertel aller Fälle von eingewilligter aktiver Sterbehilfe im hausärztlichen Bereich praktiziert wurden. Im Gegensatz zu einer ursprünglichen Absicht des Schutzes individueller Lebensgestaltung könnten Zählverfahren und distanzierende Kontrollmaßnahmen „leicht das Entgegengesetzte von dem erreichen, was eigentlich bewirkt werden soll". Die vorgesehene Kontrolle durch fünf regionale Gremien, die mit je einem Arzt, Jurist, Ethiker besetzt sein sollen, müsse wegen des immensen Arbeitsvolumens zwangsläufig ineffizient werden.

In Deutschland ist wegen der restriktiveren und unklareren Gesetzeslage von einer weitaus höheren Dunkelziffer indirekter ärztlicher Sterbehilfe-Handlungen auszugehen. Der Düsseldorfer Ethiker Dieter Birnbacher stellt das Leiden des Patienten in den Mittelpunkt seiner Betrachtungen. Der Wunsch des Patienten zu sterben, weil er nicht länger unerträgliche Schmerzen erdulden will, sei legitim und könne eine aktive Sterbehilfe rechtfertigen. Da ein einwilligungsunfähiger Patient in gleichem Ausmaße leiden könne, plädiert Birnbacher auch hier für die Euthanasie, verweist allerdings auf die Schwierigkeiten der Beurteilung. Gegen das niederländische Verfahren der Duldung, das in seinen Augen die Sicherheit, Verbindlichkeit und Autorität des Rechts beeinträchtigt, plädiert er für eine strafrechtliche Ausnahmeregelung unter der Bedingung eines unerträglichen Leidenszustandes entsprechend dem „Alternativentwurf eines Gesetzes über Sterbehilfe" (Thieme, Stuttgart 1986). Von einem Ausbau der Palliativmedizin erwartet er ein erhebliches Zurückgehen der Sterbehilfe-Wünsche. ▶

Bemerkenswerterweise kommt das einzige wesentliche Argument gegen die Euthanasie von einem katholischen Theologen, Eberhard Schockenhoff aus Freiburg. Im Annehmen des je eigenen Sterbens liege auch eine wichtige Entwicklungsmöglichkeit; allerdings könne ein solcher Gedanke wohl nicht als Anforderung an jeden Menschen gestellt werden. „Die künstliche Verlängerung des Lebens um jeden Preis und die bewusste Beschleunigung des Todes entspringen in vielfacher Hinsicht – sowohl aus der Perspektive des Arztes als auch aus der des Patienten – gegensätzlichen Absichten, aber sie stimmen darin überein, dass sie der Annahme des eigenen Todes ausweichen.“ Und: „Im Ertragen der gemeinsamen Ohnmacht zeigt sich eine tiefere menschliche Solidarität und eine entschiedenere Achtung vor der Würde des sterbenden Menschen als in dem Ausweg einer absichtlichen Herbeiführung des Todes.“

Weitere Fragen bleiben unbeantwortet: Gibt die Gewissheit einer möglichen Euthanasie dem Sterbenden vielleicht die Gelassenheit, sich dem Fortgang seines Sterbens zu stellen? Sollten die Kirchen aus Respekt vor den anders Denkenden in unserer pluralen Gesellschaft nicht doch eine zulassende (und kontrollierende) gesetzliche Regelung fördern?

Das so inhaltsreiche Buch regt zum gründlichen Nachdenken an. Mich persönlich erschreckt die Vorstellung, als Arzt eine das Leben eines Menschen beendende Infusion anzulegen, zutiefst. Sicherlich ist es aus diesem Zurückschrecken zu erklären, dass die Ärzteschaft insgesamt der Sterbehilfe weithin restriktiver gegenübersteht als die öffentliche Meinung, die der Autonomie des Einzelnen zunehmend größeres Gewicht beimisst. Wesentlich ist mir vor allem: In der Angst vor dem Versagen unserer Therapie und dem Sterben unserer Patienten sollten wir Ärzte nicht die Aufmerksamkeit für deren ganz persönliche Bedürfnisse versäumen.

Johann-Friedrich Spittler

Der Rezensent ist Oberarzt an der Neurologischen Universitätsklinik, Knappschafts-Krankenhaus, Bochum.

WISSENSCHAFT IM INTERNET

Ratespiel gegen den Computer

Robert Lembke und sein Team spielten es einstmals im Rundfunk, und Kinder pflegen lange Autofahrten damit erträglich zu machen: Ich denke mir etwas aus, und du musst mit 20 (oder 21) Ja-nein-Fragen erraten, was es ist.

Die richtigen Fragen zu stellen erfordert erheblichen Scharfsinn. Am besten hat der Rater eine Liste denkbarer Lösungen im Kopf und stellt seine jeweils nächste Frage so, dass die Liste durch die Antwort, einerlei welche, möglichst stark zusammenschrumpft. Allgemeinwissen und Denken in hierarchischen Strukturen sind hilfreich: Wenn ich die Frage „Ist es ein Vogel?“ schon mit ja beantwortet habe, erübrigt sich die Frage „Ist es ein Warmblüter?“

Um so erstaunlicher ist es, dass ein ziemlich simples Programm, das über das Internet die Rolle des Raters spielt, die stolze Erfolgsquote von 35 Prozent erreicht. Unter www.20q.net (20q wie „20 questions“) ist alle Welt eingeladen, sich Dinge auszudenken und dazu die (englischen) Fragen des Programms zu beantworten. Außer „ja“ und „nein“ sind Antworten wie „vielleicht“, „weiß nicht“ oder „kommt nicht darauf an“ erlaubt.

Was steckt hinter dem Programm? Expertensysteme, hierarchische Datenbasen für Allgemeinwissen, programmierte Schlussfolgerungsregeln? Nichts von alledem. Die ganze Weisheit sitzt in einer großen Tabelle (Matrix), die man mit etwas gutem Willen als ein sehr einfaches neuronales Netz interpretieren kann. Die Spalten entsprechen den ratbaren Begriffen und die Zeilen den möglichen Fragen. Jeder Tabelleneintrag gibt an, ob die zugehörige Antwort „ja“, „nein“ oder „unbekannt“ lautet, und zusätzlich, wie sehr oder wie sicher diese Antwort zutrifft. Hier gehen Ideen aus der Fuzzy Logic ein.

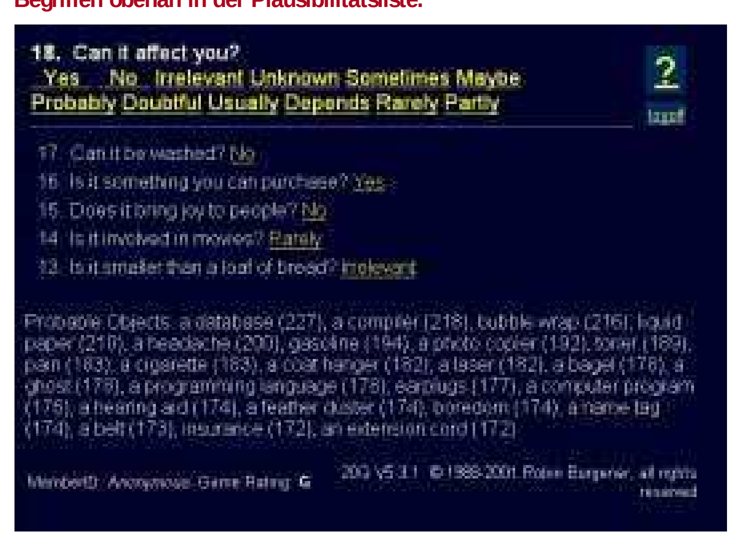
Das Programm wählt die jeweils nächste Frage nach möglichst großer Trennschärfe aus, sprich möglichst gleicher Wahrscheinlichkeit für beide Antworten; eine kleine Zufallskomponente kommt hinzu. Unterwegs zeigt es dem Benutzer die Antwortmöglichkeiten, die es zur Zeit für die plausibelsten hält, und gibt damit reichlich Anlass zur Erheiterung (Bild): Wahrlich, das Programm weiß nicht, was es tut.

Aber es wird immer besser, denn es nutzt, wie bei neuronalen Netzen üblich, die Antworten des Benutzers zur Nachbesserung seiner Tabelleneinträge. Falsche Antworten werden auf die Dauer von einer wachsenden Mehrheit richtiger unschädlich gemacht, und dank seiner Arbeitsweise ist das Programm robust gegen kleine Verschmutzungen seiner Tabelle.

Robin Burgener aus Ottawa (Kanada) betreibt das Projekt seit 1988. Der Andrang ist beträchtlich: Spielen Sie besser morgens, wenn Amerika noch schläft und der Server nicht überlastet ist. ■

Christoph Pöppe

Ich hatte „nitrogen“ (Stickstoff) im Sinn. Nach der siebzehnten Frage steht für das Programm ein wildes Sammelsurium von Begriffen obenan in der Plausibilitätsliste.





Oberflächliche Spannungen

Wenn wir ein Blatt Papier mit dem angefeuchteten Finger anheben – wirkt dann eine Klebkraft? Nein, es ist die allgegenwärtige, aber nur selten bemerkte Oberflächenspannung.

VON WOLFGANG BÜRGER

GRAFIK: AXEL WEIGEND

Ein Saugnapf aus Wasser: Wer feuchte Hände hat, sollte mit Gegenständen, die einerseits leicht und andererseits durch Wasser benetzbar sind, vorsichtig umgehen. Wenn Sie im Badezimmer ein leichtes Parfümfläschchen mit der nassen Hand auf die Konsole vor dem Spiegel stellen und die Hand eilig zurückziehen, müssen Sie damit rechnen, dass die Flasche an Ihrem Finger haften bleibt, ins Rutschen kommt und ins Waschbecken purzelt.



NAS / HERMANN EISENBEISS / OKAPIA

Die Oberflächenspannung des Wassers trägt den Wasserläufer (links). Die Wasserspinne (unten) hält sich zum Atmen und zur Aufzucht ihrer Kinder eine Luftblase, die durch die Oberflächenspannung des umgebenden Wassers stabilisiert wird.



J.A.L. COOKE / OSF / OKAPIA

Das liegt nicht etwa daran, dass Ihre Finger klebrig wären. Reines Wasser ist kein Klebstoff. Vielmehr wirken in diesem Fall Kapillarkräfte, die auf seiner Oberflächenspannung beruhen. Sie können wohl eine Hand vorübergehend an einer Flasche haften lassen, aber keine dauerhaften Verbindungen herstellen. Für Lebewesen von der Größe eines Menschen sind sie eine vergleichsweise schwache Naturkraft, leichter zu messen als zu fühlen, und werden daher im täglichen Leben nur selten zur Kenntnis genommen.

Dagegen ist für kleine Tiere von einem Zentimeter Länge und weniger, die dicht unter oder über der Oberfläche des Wassers zu Hause sind, die Oberflächenspannung groß und von lebenswichtiger Bedeutung. Sie kann ebenso Schutz oder Helfer wie dauernde Bedrohung sein.

Die räuberische Wasserspinne (*Argyroneta aquatica*) webt sich unter Wasser eine große Luftglocke mit so engen Maschen, dass die Oberflächenspannung sie abdichtet. In ihr lebt und atmet sie, pflanzt sich fort und zieht ihren Nachwuchs groß.

Der grazile Wasserläufer (*Gerris lacustris*) lässt sich sogar von der Wasserfläche tragen, auf der er sich flink bewegt und nach Beute jagt (Bilder links). Dichte, Wasser abstoßende Behaarung an den Beinen und am ganzen Körper schützt die kleinen Luft atmenden Insekten vor der Gefahr, vom Wasser aufgesogen und ertränkt zu werden. Die Wasserspinne nutzt darüber hinaus sogar aktiv das kleine Volumen zwischen ihren Körperhaaren, um den zum Leben nötigen Luftvorrat in ihre Wohnblase zu transportieren.

Auch wir nutzen Kapillarkräfte aus, zum Beispiel, wenn wir kleine Papierstückchen von der Tischplatte klauben oder ein Stück Aluminium- oder Plastikfolie vom Fußboden auflesen. Um uns die Oberflächenspannung dienstbar zu ma-

Berechnung der Oberflächenspannung

Die Kraft des feuchten Fingers

Nehmen wir der Einfachheit halber an, Fingerkuppe und Folie seien dort, wo sie den Tropfen berühren, eben und der Wasserfilm in seiner Ebene drehsymmetrisch. Das Gewicht des Wassertropfens ist noch kleiner als das Gewicht der Folie. Der Innendruck p_i darf deshalb (und der Außendruck p_a selbstverständlich auch) als konstant vorausgesetzt werden. Der oben und unten ebene Wasserfilm ist rund herum gegen die Luft durch eine doppelt gekrümmte Oberfläche mit den konstanten Krümmungsradien a und r ($r \ll a$) begrenzt.

Nach einer Formel von Laplace („Druckdifferenz gleich Oberflächenspannung mal mittlere Krümmung") springt der Druck beim Durchgang durch die zweifach gekrümmte Oberfläche des Wasserfilms von innen nach außen um den Betrag

$$\Delta p = p_a - p_i = \sigma \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{a} \right) .$$

Darin bedeutet σ die Oberflächenspannung des Wassers (für reines Wasser bei Zimmertemperatur ist $\sigma = 73$ g/s^2 oder dyn/cm). Wenn θ den Randwinkel der Oberfläche bedeutet (der hier auf beiden Ufern als gleich angenommen ist), hängt der Krümmungsradius r mit dem Abstand d geometrisch durch $d = 2r \cos\theta$ zusammen. Das Gewicht G, das der Film im Gleichgewicht trägt, ist damit genähert $\pi a^2 \Delta p$. Es kann nicht beliebig groß werden, weil der Innendruck den Dampfdruck des Wassers nicht unterschreiten und erst recht nicht negativ werden kann. Damit ergibt sich der Abstand d im Gleichgewicht zu

$$d = \frac{2\pi a^2 \sigma \cos\theta}{G} .$$

Mit den Werten $\theta = 60°$, also $\cos\theta = 1/2$ (geschätzt), $a = 0{,}3$ cm (beobachtet) und $G = 10^{-3}$N (Newton) entsprechend einer Masse von 0,1 Gramm ergibt sich ein Gleichgewichtsabstand d von 0,5 Millimetern. Für den Krümmungsradius r ergibt sich ($r = d/(2\cos\theta) = d$) derselbe Wert – zu klein, um die Berechnung mit unbewaffnetem Auge zu verifizieren.

Die Auswirkung von Maßstabsänderungen studiert man mit Hilfe dimensionsloser Kennzahlen, die Verhältnisse der als wichtig erkannten Einflussgrößen sind. Für die Wechselwirkung von Gewicht und Oberflächenspannung und daher für die Formen von Tropfen unter Schwereeinfluss ist diese charakteristische Kennzahl die Bondzahl $\mathrm{Bo} = \rho g L^2/\sigma$ (ρ Dichte, g Schwerebeschleunigung, L charakteristische Länge, σ Oberflächenspannung). Bei Vergrößerung der charakteristischen Länge L von 1 cm (Insekt) auf 2 m (Mensch), also um den Faktor $\lambda = 200$, treffen wir auf geometrisch ähnliche Tropfen, wenn die Bondzahl ungeändert bleibt. Bei gleicher Dichte und Schwere ist das der Fall, wenn die Oberflächenspannung um den Faktor $\lambda^2 = 40\,000$ vergrößert wird. Eine solche fiktive Welt wäre allerdings auch mit viel Fantasie nicht konsistent denkbar: Die Oberflächenspannung hängt von den zwischenmolekularen Kräften ab. Wollte man diese entsprechend vergrößern, würde auch die Dichte enorm anwachsen, und alle anderen Eigenschaften der Flüssigkeit würden sich so ändern, dass Wasser nicht wieder zu erkennen wäre.

chen, feuchten wir einen Finger durch Anhauchen oder Anlecken an und drücken ihn fest aufs Objekt. Beim Anheben der Hand bleiben Papier oder Folie am Finger haften, wenn sie nicht zu schwer sind. Für den Zusammenhalt sorgt ein dünner Wasserfilm, in dem ein leichter Unterdruck herrscht wie in dem Luftvolumen unter der Glocke eines gewöhnlichen Gummi-Saugnapfes. Aber dieser geringere Druck wird durch keine Gummi-Manschette gegen den äußeren Überdruck abgedichtet, sondern die Oberflächenspannung in seinem Meniskus – das ist seine rund herum gekrümmte Oberfläche gegen die Luft – macht den Drucksprung möglich. Die Bezeichnung „Saugnapf" trifft in beiden Fällen nicht den Sinn, denn da stehen keine kleinen grünen Männchen bereit und saugen Papiere oder Folien an. Vielmehr werden diese vom höheren Außendruck angepresst, und es wäre sinnvoller, von „Drucknäpfen" zu sprechen. Auf dem Mond, wo überhaupt kein Luftdruck herrscht, wären „Saugnäpfe" unbrauchbar.

Oberflächenspannung: Flüssigkeiten haben keine Häute, besitzen aber durch die wechselseitige Anziehung ihrer Moleküle, durch die sie überhaupt zu Flüssigkeiten werden, an der Oberfläche eine besondere Spannung. Wo nach außen gerichtete Kräfte fehlen, stellt die Oberflächenspannung Gleichgewicht her.

Mit der Spannung einer elastischen Gummihaut hat diese Art von Spannung sehr wenig gemein. Während beispielsweise die Haut eines Luftballons in jedem Zustand aus denselben Gummiteilchen besteht und zur Vergrößerung ihrer Oberfläche Arbeit gegen die mit zunehmender Ausdehnung in der Regel wachsenden elastischen Bindungskräfte zu leisten ist, hängt der Aufwand an mechanischer Arbeit zur Vergrößerung einer Flüssigkeitsoberfläche von ihrer aktuellen Größe überhaupt nicht ab. Die aufzuwendende Energie dient allein dazu, Moleküle aus dem Inneren herbeizuschaffen und mit ihnen neue Oberfläche zu bilden. Umgekehrt verkleinern Flüssigkeiten gerne ihre Oberfläche, indem ▶



sie andere Körper benetzen, sofern sie dadurch einen energetisch günstigeren Zustand einnehmen können.

Wie gern Wasser Oberflächen benetzt, lässt sich ohne viel Aufwand mit Utensilien aus der Küche vorführen. Setzen Sie in die Mitte eines kleinen Stücks Aluminiumfolie (von wenigen Quadratzentimetern Fläche und wenigen hundertstel Gramm Masse) einen Wassertropfen. Nützlich zum Dosieren kann ein ausgedienter Tropfer aus der Hausapotheke sein. Geht man sehr langsam mit dem Finger an den Tropfen heran, kann man den Augenblick abpassen, in dem die Fingerkuppe den Tropfen berührt und die Folie mitsamt dem Tropfen einen kleinen Sprung nach oben macht: Der Tropfen breitet sich begierig über die Fingerkuppe aus, wird dabei flacher und muss dazu die Folie etwas anheben (Bild auf der vorigen Seite rechts). Von der Seite zeigt sich ein ringförmiger „Meniskus“, der den zusammengedrückten Wassertropfen umschließt (Kasten auf der vorigen Seite). Je dünner und je ausgedehnter der Wasserfilm ist, desto größere Lasten kann er tragen. Mikroskopier-Gläschen (Objektträger) mit großen Flüssigkeitsfilmen sind sehr schwer voneinander zu lösen; es bleibt einem nichts anderes übrig, als sie parallel zu verschieben (und dabei gegen die innere Reibung der Flüssigkeit Arbeit zu leisten).



HERBERT SCHWIND / OKAPIA

Der Rückenschwimmer hängt an der Wasseroberfläche, so wie der Wasserläufer (Seite 112) auf ihr ruht. In beiden Fällen trägt die Oberflächenkraft das Gewicht des Tieres.



Ein Flüssigkeitstropfen, der etwa auf einer Folie aufliegt, strebt danach, seine Grenzfläche gegen die Luft zu verkleinern. Am Rande der Auflagefläche ist die zugehörige Kraft tangential zur Tropfenoberfläche, das heißt schräg nach oben gerichtet (alle anderen Komponenten heben sich wegen der Radialsymmetrie auf). Eine hinreichend weiche Folie gibt dieser Kraft nach.

Aufschlussreich ist ein ähnliches Experiment mit einem genauso kleinen Rechteck aus sehr dünner, flexibler Frischhaltefolie. Ein Wassertropfen, den man in seine Mitte setzt, wickelt sich allmählich in die Folie ein! Auf ebener Folie ist der Tropfen offenbar nur dann im mechanischen Gleichgewicht, wenn die Folie steif genug ist und ihrer Verbiegung durch die Oberflächenspannung widerstehen kann (was für Aluminiumfolie der Fall ist). Flexible Folie wird von der Oberflächenspannung am Tropfenrand nach oben gezogen. Der Tropfen kann also Energie gewinnen, indem er ein Stück freie Oberfläche mit der Luft gegen ein Stück Grenzfläche mit der Folie eintauscht. Das genaue Endergebnis der Einwickel-Aktion ist schwer vorhersagbar, weil der Tropfen selten genau in die Mitte der Probe fällt und außerdem der von der Verformung abhängige Flächeninhalt der Tropfenoberfläche und ihr foliebedeckter Teil nur schwer abzuschätzen sind.

Riesentropfen: Stellen Sie sich vor, Sie erwachen eines Morgens, schauen aus dem Fenster und finden sich in einer Welt wieder, in der die Oberflächenspannung um vier bis fünf Zehnerpotenzen gewachsen ist. Die Straße, die Häuser, die geparkten Autos sehen wie immer aus, aber zur gewohnten Tageszeit fehlen die sonst vertrauten Passanten. In der Nacht hat es wohl geregnet, davon sind Pfützen stehen geblieben. Aber was für Pfützen! Sie sehen eher wie riesige Wassertropfen aus. Eine Kolonne Stadtreiniger bemüht sich mit großen Besen, die übrig gebliebene Flut zu beseitigen. Ihre Besen sehen aus der Entfernung ziemlich merkwürdig aus. Rund herum und sogar am Stiel scheinen sie dicht mit feinen Borsten besetzt zu sein. Auch die Männer tragen borstige Kleidung bis zu den Schuhen hinunter. Voller Wissbegier ziehen Sie sich rasch etwas über, rennen auf die Straße und gehen auf eine der Pfützen zu, die wie große Tropfen am Wege stehen. Ein Arbeiter läuft noch erschrocken auf Sie zu und ruft: „Vorsicht, nichts anfassen!“ Aber zu spät: Sie haben sich längst gebückt und die flache Hand auf einen der meterhohen Tropfen gelegt, um ihn anzufühlen. Und augenblicklich erfasst Sie eine tonnenschwere Kraft und zieht Sie am Arm in den Tropfen oder, je nach der Menge, das Wasser kommt über Sie und saugt Sie auf. Dabei können Sie noch von Glück reden, dass der Riesentropfen trotz seiner zwei Tonnen Wasser viel zu klein ist, um Sie völlig zu umhüllen und zu ertränken.

Erwachen wir aus unserem Traum – er ist ohnehin ziemlich unphysikalisch (siehe Kasten auf der vorigen Seite). Aber was für uns wilde Fantasie ist, das ist für Tiere von Insektengröße bittere Realität. Nicht umsonst tragen Bienen und Fliegen so viele Borstenhaare. Umgekehrt: Freuen wir uns unserer Größe! Wir müssten sonst, im Interesse unseres Überlebens, ziemlich kratzbürstig sein. ■

Literaturhinweis

Air and Water. Von Mark W. Denny. Princeton University Press, Princeton (NJ) 1993, Nachdruck 1995.

Der Kernspintomograph

Bildgebende Verfahren sind aus dem klinischen Alltag nicht mehr wegzudenken. Sie helfen beispielsweise innere Organe auf Tumorbefall oder Verletzungen zu untersuchen und eine Therapie zu planen.

Anders als die auf Röntgentechnik basierende Computertomographie kommt die Kernspin- beziehungsweise Magnetresonanz-Tomographie (MRT) dabei ohne schädigende Strahlung aus.

Dazu werden meist Wasserstoffkerne (Protonen) zu Schwingungen angeregt. Aus deren Verhalten errechnen Computer Gewebedaten, und zwar in Schnitten durch den Körper angeordnet. Daraus können dann wiederum dreidimensionale Darstellungen anatomischer Strukturen konstruiert werden.

In der Empfangsspule laufen Signale aus der gesamten untersuchten Körperregion ein. Um sie ihren Ursprungsorten zuzuordnen, überlagert man dem Hauptmagnetfeld ein so genanntes Gradientenfeld, also ein in einer Richtung an Stärke zunehmendes Magnetfeld – Signale von verschiedenen Orten unterscheiden sich dann leicht in ihrer Frequenz beziehungsweise nach dem Abschalten der Gradientenfelder in ihrer Phase. Strukturen von weniger als einem Millimeter Abstand lassen sich so auseinander halten.

Die heutige Kernspintomographie vermag zudem auch physiologische Größen wie Temperatur, Blutflussgeschwindigkeit, Gewebeelastizität oder Sauerstoffkonzentrationen darzustellen, zum Teil unter Einsatz spezieller Kontrastmittel.

Beispielsweise nutzen Neurologen das Verfahren, um zu klären, welche Gehirnregionen bei bestimmten Aufgabenstellungen zur Lösung herangezogen werden: Aktive Bereiche benötigen mehr Sauerstoff, und der lässt sich mit MRT darstellen. Überdies können moderne Geräte Bilder in weniger als einer Sekunde aufnehmen, sodass sich auch bewegte Vorgänge wie das Schlagen des Herzens abbilden lassen. ■

Ulrich Katscher

Der Autor ist promovierter Physiker. Er arbeitet in den Hamburger Forschungslaboratorien des Elektronikkonzerns Philips, einem Hersteller von MRT-Systemen.

z

M

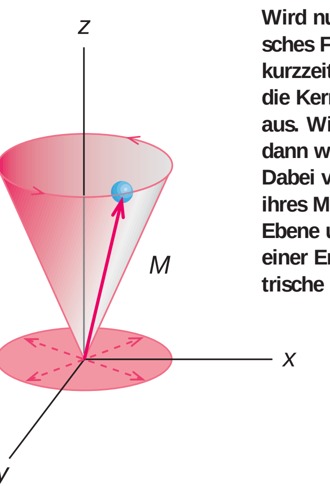
x

y

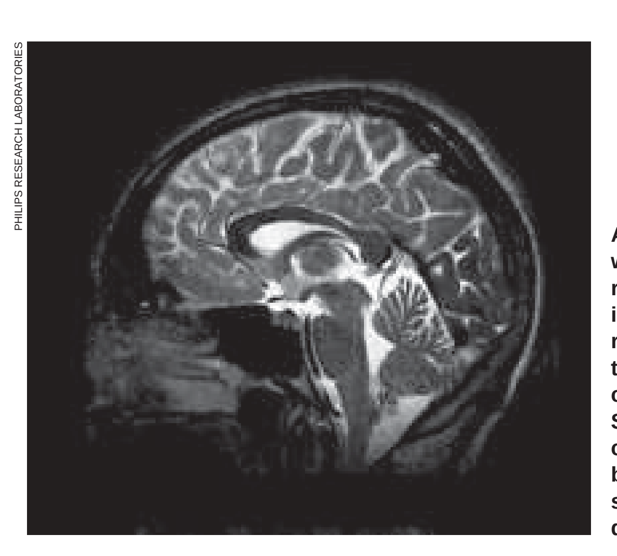
Magnetfeld

Atomkerne in den Geweben, insbesondere die des reichlich vorhandenen Wasserstoffs (Protonen), haben auf Grund ihrer elektrischen Ladung und Eigenrotation ein magnetisches Moment M; einfach gesagt, verhalten sie sich wie kleine Stabmagnete. Ein starkes Magnetfeld kann sie deshalb entlang seiner Feldlinien ausrichten.

GRAFIKEN: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Wird nun ein elektromagnetisches Feld sehr hoher Frequenz kurzzeitig überlagert, lenkt es die Kerne aus ihrer Ruhelage aus. Wie Kreisel rotieren sie dann wieder dorthin zurück. Dabei verändert sich der Anteil ihres Magnetfeldes in der x-y-Ebene und induziert deshalb in einer Empfangsspule eine elektrische Spannung – das Signal.



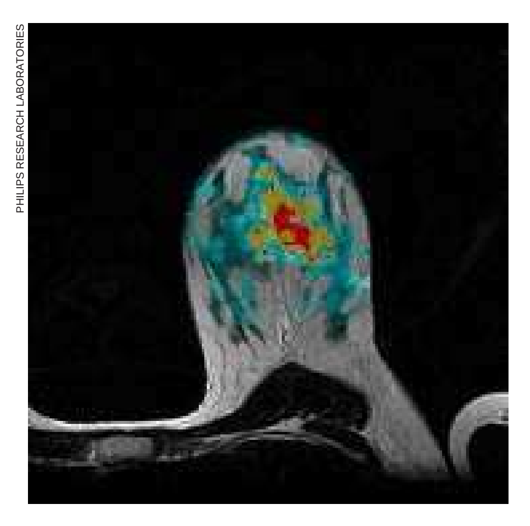
PHILIPS RESEARCH LABORATORIES

Aus dem Signal berechnet ein Computer beispielsweise die Dichte der Protonen im untersuchten Bereich. Da sich verschiedene Gewebe oft hinsichtlich ihres Wassergehalts unterscheiden, bildet das bereits die Grundlage zur Darstellung der Körperstruktur. Den größten Kontrast zwischen unterschiedlichen Gewebearten ergeben die Abklingzeiten der Signale (Relaxationszeiten), denn diese hängen vom chemischen Umfeld der Wasserstoffatome ab. So besitzen graue und weiße Hirnsubstanz fast identische Protonendichten, unterscheiden sich aber in den Abklingzeiten um etwa 15 Prozent.

PHILIPS RESEARCH LABORATORIES

Ein handelsüblicher Kernspintomograph mit der typischen Röhrenform. Ihr Durchmesser beträgt an der engsten Stelle etwa 60 Zentimeter. Das 1,5 Tesla starke Hauptmagnetfeld wird von einer mit Helium gekühlten, supraleitenden Spule erzeugt. Zur Ortscodierung kann es durch ein Gradientenfeld um maximal 0,06 Tesla pro Meter variiert werden.

PHILIPS RESEARCH LABORATORIES



Bei diesem Bild einer weiblichen Brust mit großer Krebsgeschwulst wurden zwei Kernspinaufnahmen überlagert. Während graue Bereiche die Anatomie wiedergeben, helfen bunte, Unterschiede in der Gewebe-Elastizität zu erkennen. Gesundes Gewebe ist nämlich – vereinfacht gesagt – gleichmäßig elastisch (blau), lokal hohe Werte (rot) spiegeln oft eine Bösartigkeit des Tumors.

Die Dynamik der Polkappen

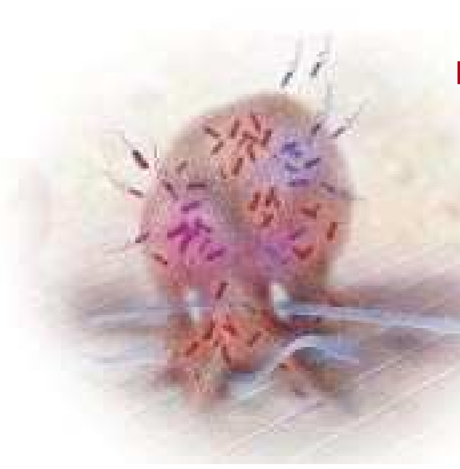


Lässt die Erderwärmung das Eis der Antarktis schmelzen und Tiefländer im Meer versinken? Die Polkappen reagieren, wie neue Modelle ihrer Eisdynamik zeigen – jedoch erst mit mehrtausendjähriger Verspätung.



Das Ende des Schmetterlingseffektes

Kleine Ursachen können zwar große Wirkungen haben; aber dass der Flügelschlag eines Schmetterlings einen Wirbelsturm auslösen könnte, ist eine Fehlinterpretation eines sehr vereinfachten Chaos-Modells.

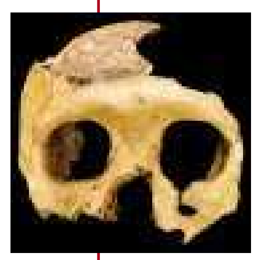


Bakterielle Biofilme

Viele auch schädliche Bakterien lieben Gesellschaft, denn das macht sie weniger angreifbar. Ihr Kommunikationssystem ist dabei der Lebensnerv, den Forscher im Kampf gegen Mikroben zu treffen suchen.

Weitere Themen im November

Urmenschen waren Kannibalen

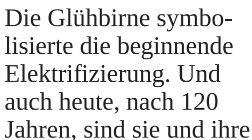


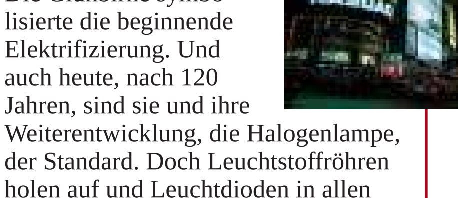
Spuren von Kannibalismus hinterließen Ureuropäer und Neandertaler auf fossilen Menschenknochen. Wozu die offenbar verbreitete Praxis diente, ob beispielsweise der Ernährung oder religiösen Riten, ist aber unklar.

CyberCells

Computermodelle, die komplette lebende Zellen nachbilden, haben mit Komplexität und Dynamik der Stoffwechselnetze und der genetischen Regulation zu kämpfen. Doch es gibt Anzeichen dafür, dass wenige große Prinzipien das Verhalten von Zellen bestimmen.

Neue Lichtquellen





Die Glühbirne symbolisierte die beginnende Elektrifizierung. Und auch heute, nach 120 Jahren, sind sie und ihre Weiterentwicklung, die Halogenlampe, der Standard. Doch Leuchtstoffröhren holen auf und Leuchtdioden in allen Farben sind heiß ersehnt.